

# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado en ingeniería de producción, minero-ambiental y de proyectos



**Tesis Doctoral**

**APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL AGUA DE  
LAS MINAS ABANDONADAS DEL VALLE LACIANA**

AUTOR

D. Alejandro Matas Escamilla

Oviedo 2021



## RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

| 1.- Título de la Tesis   |   |
|--|---|
| Español/Otro Idioma: Aprovechamiento energético del agua de las minas abandonadas del Valle Laciana. | Inglés: Energy use of mine water from abandoned mines in the Laciana Valley |
| 2.- Autor  |   |
| Nombre: Alejandro Matas Escamilla  | DNI/Pasaporte/NIE:  |
| Programa de Doctorado: Ingeniería de producción, minero-ambiental y de proyectos.                    |   |
| Órgano responsable: Centro Internacional de Postgrado.   |   |

### RESUMEN (en español)

El Valle Laciana se trata de una zona geográfica situada al noroeste de la provincia de León (España) en la que se ha desarrollado la actividad de extracción de carbón durante buena parte del siglo XX. La coyuntura económica y social de las primeras dos décadas del siglo XXI ha provocado el cierre de las explotaciones mineras, lo que ha repercutido gravemente en la zona, forzando un éxodo masivo tanto de personas como de capitales.

El presente doctorado pretende estudiar una solución que favorezca la situación actual del Valle Laciana aprovechando el potencial energético de las aguas de sus minas. El abandono de las mismas ha favorecido la recuperación del nivel freático original apareciendo numerosas surgencias a lo largo del Valle.

Para valorar el potencial energético de las aguas de mina del Valle Laciana se ha llevado a cabo una caracterización de las aguas de nueve puntos donde emanan naturalmente las mismas. En concreto, se han caracterizado las aguas de la mina de montaña de Calderón (en bocamina y en la zona de transformadores), la mina de montaña de Lumajo, la mina de montaña de Carrasconte, la mina de Bolsada (en Caboalles de Arriba y en Caboalles de Abajo), la mina de montaña de Paulina, el pozo María y la mina de montaña Transversal de Villablino. Se ha medido la temperatura y una serie de parámetros que permiten conocer la naturaleza de las mismas, a través de los índices de Langelier y de Ryznar. También se ha estudiado su composición química a través de un estudio de cationes y se han definido los tratamientos necesarios según su naturaleza. Se han evaluado diversas tecnologías de aprovechamiento energético del agua de las minas entre las que destacan la geotermia con circuito cerrado, la geotermia con circuito abierto, la hidroelectricidad a través de microturbinas y la hidroelectricidad convencional, resultando la geotermia con circuito abierto la más ventajosa.

También se ha elaborado un estudio de alternativas de implantación de aprovechamiento geotérmico en los lugares evaluados en la caracterización de las aguas de mina. En el estudio se han tenido en cuenta factores como la temperatura, la necesidad de tratamiento, la inversión estimada, la población abastecida, los posibles clientes y la capacidad de ampliación.

Tras realizar los estudios de alternativas, tanto tecnológicas como de localización y recurso, se llegó a la conclusión de que la opción más ventajosa es la del aprovechamiento geotérmico con circuito abierto de las aguas de la mina de montaña de Calderón.

Se ha estudiado la problemática de diseño de una red de calor que pueda abastecer, tanto de calefacción como de agua caliente sanitaria, a ocho edificios públicos de la localidad de Villablino. Para ello, se han modelizado los diversos elementos del sistema y se han analizado las variables de diseño que afectan al rendimiento y viabilidad del conjunto.

Entre las modelizaciones realizadas se encuentran las del sistema de generación, compuesto por dos enfriadoras dispuestas en serie y a contraflujo, un intercambiador de calor de carcasa y



tubo para agua de mina y un depósito térmico que acumule el agua de mina y sirva de regulación del sistema. También, se han modelizado las conducciones de la red de calor que lleva el agua desde la sala de generación hasta los clientes, analizando su diámetro, tipología y aislamiento, y viendo la afección de estos parámetros a la viabilidad técnica del sistema. Se ha estudiado, a su vez, la implementación de los equipos de la red de calor en las salas técnicas de cada uno de los clientes detallando las conexiones necesarias para abastecer geotérmicamente los circuitos de calefacción existentes.

Por último, se ha confeccionado un análisis económico de la red de calor de Villablino, donde se ha estudiado su rentabilidad.

### **RESUMEN (en Inglés)**

Laciana Valley is an area located in northwest Leon (Spain) in which the activity of coal extraction has been developed during the twentieth century. The economic and social situation of the first two decades of the 21st century has led to the closure of mining operations, which has had serious repercussions on the area, forcing a massive exodus of both people and money.

The present thesis aims to propose a solution that favours the current situation of the Laciana Valley by taking advantage of the energy potential of the waters of its mines. The abandonment of the mines has favoured the recovery of the original phreatic level, with the appearance of numerous springs along the valley.

A characterisation of the waters at nine points has been carried out in order to evaluate the energy potential of the mine waters of the Laciana Valley. Specifically, the waters of Calderón mountain mine (at the entrance of the mine and in the transformer area), Lumajo mountain mine, Carrasconte mountain mine, Bolsada mine (in Caboalles de Arriba and Caboalles de Abajo), Paulina mountain mine, María mine pit and Transversal Villablino mountain mine have been characterized. The temperature and a series of parameters have been measured for each of these waters and their locations, which allow us to know the nature of these waters through the Langelier and Ryznar indexes. Their chemical composition has also been studied through a cation study and the necessary treatments have been defined according to their nature.

Various technologies for the energy use of mine water have been evaluated, including closed circuit geothermal energy, open circuit geothermal energy, hydro power through microturbines and conventional hydro power. Open circuit geothermal energy has been shown as the most advantageous technology in this case.

A study of alternatives for implementing geothermal energy in the places evaluated has also been made, considering factors such as temperature, the need for treatment, the estimated investment, the population supplied, possible clients and the capacity for expansion.

It was concluded that the most advantageous option is to carry out a geothermal exploitation with an open circuit in the facilities of Calderón mine pit and to use the waters of the Calderón mountain mine for energy purposes.

The design problems of a heat network that can supply both heating and domestic hot water to eight public buildings in the town of Villablino have been studied. For this purpose, the different elements of the system have been modeled and the design variables that affect the



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

performance and viability of the system have been analyzed.

Among the modeling carried out are those of the generation system, consisting of two chillers arranged in series and counterflow, a shell and tube heat exchanger for mine water and a thermal reservoir that accumulates the mine water and serves to regulate the system. Also, the heat network piping that carries the water from the generation room to the customers has been modeled, analyzing its diameter, typology and insulation, and looking at the effect of these parameters on the technical feasibility of the system. The implementation of the heat network equipment in the technical rooms of each of the clients has been studied, detailing the necessary connections to supply geothermal energy to the existing heating circuits.

Finally, an economic analysis of the Villablino heat network has been developed.

**SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO  
EN OVIEDO.**



Todos somos aficionados. La vida es tan corta que no da para más. **Charles Chaplin**



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a **D. Jorge Loredó**, director de los primeros cuatro años de esta tesis, por su dedicación, apoyo y guía durante el desarrollo de la misma. Sin su inestimable ayuda no se podrían haber presentado los artículos correspondientes en congresos internacionales y cumplir así los requisitos mínimos para poder presentar esta tesis.

También le estoy muy agradecido a **D. Rodrigo Álvarez** por acceder a ser el director de esta tesis durante el último año de la misma. Sus consejos, correcciones y esfuerzo han servido para darle una mayor calidad y rigor al documento final.

Mención especial merece **D. Francisco García** por su ayuda en la elaboración de la tesis, como codirector de la misma, y por su comprensión y apoyo como gerente de la empresa MAGNA DEA, S.L., en la cual he estado trabajando paralelamente al desarrollo de la tesis.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a **D. Santiago Solís**, responsable de I+D+i de Magna Dea, S.L., por su atención y por la ayuda prestada en la resolución de las dudas surgidas durante la realización del trabajo. Es necesario mencionar al resto del equipo de Magna Dea, S.L., que ha sabido convivir conmigo profesionalmente en la difícil tarea de compaginar vida profesional y doctoral. **D. Rubén Gallego**, **D. Diego Forcelledo**, **D. Alejandro Bernáin**, **D. Ignacio Pérez** y **D. Lorenzo Fernández**, muchas gracias por vuestro apoyo y ayuda en el ámbito profesional.

De forma especial debo agradecerle a **D<sup>a</sup> Laura Álvarez**, compañera profesional, doctoral y sentimental, por su enorme apoyo y comprensión durante los años de elaboración de esta tesis. Las cargas siempre resultan más livianas si se comparte el peso de las mismas.

Considero necesario mencionar en estos agradecimientos a **D. José Luis Álvarez**, antiguo minero en las minas del Valle Laciaana, por su inestimable ayuda en la campaña de caracterización, por su compañía y por el conocimiento que me ha transmitido del conjunto de las minas recogidas en el estudio. Así como a **Faustino Fernández** por la documentación de las minas abandonadas facilitada.

Las visitas a las salas técnicas de los clientes han sido posibles gracias a las personas que me han permitido visitarlas y que me han acompañado en las mismas. Deseo agradecer a **Mario Rivas**, alcalde de Villablino, **Hermelinda Rodríguez**, concejal de economía, hacienda y cuentas, personal, asuntos jurídicos y nuevas tecnologías del ayuntamiento de Villablino y a **Gonzalo Méndez**, responsable técnico del ayuntamiento de Villablino, por haberme facilitado el acceso a las salas técnicas dependientes del Ayuntamiento de Villablino. Deseo



agradecer a **Pablo A. Merino**, secretario del IES Obispo Argüelles, por haberme facilitado información y el acceso a las salas técnicas del IES Obispo Argüelles. También deseo agradecer a **Araceli Francés**, directora del Centro de Salud Valle Laciana y **Umberto Lareo**, técnico del Centro de Salud Valle Laciana, que me hayan acompañado en la visita de la sala técnica del centro y me hayan autorizado el acceso a la misma.

Tanto **Paola García**, de la empresa Carrier, como **Héctor Pérez**, de la empresa Italsan, han contestado amablemente todas las dudas surgidas al respecto de sus equipos y productos en el diseño de la red de calor de Villablino y por ello les estoy profundamente agradecido.

Seguramente no haya podido concentrar en estos agradecimientos a todas las personas que se merecen estar específicamente mencionadas de una manera o de otra. Entre ellos destacan mi familia y mis amigos que con su gran afecto han conseguido hacerme feliz a pesar del gran esfuerzo realizado. A ellos y a todas las personas que han estado presentes en mi vida durante estos años: **MUCHAS GRACIAS**.



## RESUMEN

El Valle Laciana se trata de una zona geográfica situada al noroeste de la provincia de León (España) en la que se ha desarrollado la actividad de extracción de carbón durante buena parte del siglo XX. La coyuntura económica y social de las primeras dos décadas del siglo XXI ha provocado el cierre de las explotaciones mineras, lo que ha repercutido gravemente en la zona, forzando un éxodo masivo tanto de personas como de capitales.

El presente doctorado pretende plantear una solución que favorezca la situación actual del Valle Laciana aprovechando el potencial energético de las aguas de sus minas. El abandono de las mismas ha favorecido la recuperación del nivel freático original apareciendo numerosas surgencias a lo largo del Valle.

Para valorar el potencial energético de las aguas de mina del Valle Laciana se ha llevado a cabo una caracterización de las aguas de nueve puntos donde emanan naturalmente las mismas. En concreto, se han caracterizado las aguas de la mina de montaña de Calderón (en bocamina y en la zona de transformadores), la mina de montaña de Lumajo, la mina de montaña de Carrasconte, la mina de Bolsada (en Caboalles de Arriba y en Caboalles de Abajo), la mina de montaña de Paulina, el pozo María y la mina de montaña Transversal de Villablino. Para cada una de estas aguas y sus localizaciones se han medido la temperatura y una serie de parámetros que permiten conocer la naturaleza de las mismas, a través de los índices de Langelier y de Ryznar. También se ha estudiado su composición química a través de un estudio de cationes y se han definido los tratamientos necesarios según su naturaleza.

Se han evaluado diversas tecnologías de aprovechamiento energético del agua de las minas entre las que destacan la geotermia con circuito cerrado, la geotermia con circuito abierto, la hidroelectricidad a través de microturbinas y la hidroelectricidad convencional, resultando la geotermia con circuito abierto la más ventajosa.

También se ha elaborado un estudio de alternativas de implantación de aprovechamiento geotérmico en los lugares evaluados en la caracterización de las aguas de mina. En el estudio se han tenido en cuenta factores como la temperatura, la necesidad de tratamiento, la inversión estimada, la población abastecida, los posibles clientes y la capacidad de ampliación.

Tras realizar los estudios de alternativas tanto tecnológicas como de localización y recurso, se llegó a la conclusión de que la opción más ventajosa es realizar un aprovechamiento geotérmico con circuito abierto en las instalaciones del pozo Calderón y aprovechar energéticamente las aguas de la mina de montaña de Calderón.





Se ha estudiado la problemática de diseño de una red de calor que pueda abastecer, tanto de calefacción como de agua caliente sanitaria, a ocho edificios públicos de la localidad de Villablino. Para ello, se han modelizado los diversos elementos del sistema y se han analizado las variables de diseño que afectan al rendimiento y viabilidad del conjunto.

Entre las modelizaciones realizadas se encuentran las del sistema de generación, compuesto por dos enfriadoras dispuestas en serie y a contraflujo, un intercambiador de calor de carcasa y tubo para agua de mina y un depósito térmico que acumule el agua de mina y sirva de regulación del sistema. También, se han modelizado las conducciones de la red de calor que lleva el agua desde la sala de generación hasta los clientes, analizando su diámetro, tipología y aislamiento, y viendo la afección de estos parámetros a la viabilidad técnica del sistema. Se ha estudiado, a su vez, la implementación de los equipos de la red de calor en las salas técnicas de cada uno de los clientes detallando las conexiones necesarias para abastecer geotérmicamente los circuitos de calefacción existentes.

Por último, se ha confeccionado un análisis económico de la red de calor de Villablino, donde se ha estudiado su rentabilidad.



## ABSTRACT

Laciana Valley is an area located in northwest Leon (Spain) in which the activity of coal extraction has been developed during the twentieth century. The economic and social situation of the first two decades of the 21st century has led to the closure of mining operations, which has had serious repercussions on the area, forcing a massive exodus of both people and money.

The present thesis aims to propose a solution that favours the current situation of the Laciana Valley by taking advantage of the energy potential of the waters of its mines. The abandonment of the mines has favoured the recovery of the original phreatic level, with the appearance of numerous springs along the valley.

A characterisation of the waters at nine points has been carried out in order to evaluate the energy potential of the mine waters of the Laciana Valley. Specifically, the waters of Calderón mountain mine (at the entrance of the mine and in the transformer area), Lumajo mountain mine, Carrasconte mountain mine, Bolsada mine (in Caboalles de Arriba and Caboalles de Abajo), Paulina mountain mine, María mine pit and Transversal Villablino mountain mine have been characterized. The temperature and a series of parameters have been measured for each of these waters and their locations, which allow us to know the nature of these waters through the Langelier and Ryznar indexes. Their chemical composition has also been studied through a cation study and the necessary treatments have been defined according to their nature.

Various technologies for the energy use of mine water have been evaluated, including closed circuit geothermal energy, open circuit geothermal energy, hydro power through microturbines and conventional hydro power. Open circuit geothermal energy has been shown as the most advantageous technology in this case.

A study of alternatives for implementing geothermal energy in the places evaluated has also been made, considering factors such as temperature, the need for treatment, the estimated investment, the population supplied, possible clients and the capacity for expansion.

It was concluded that the most advantageous option is to carry out a geothermal exploitation with an open circuit in the facilities of Calderón mine pit and to use the waters of the Calderón mountain mine for energy purposes.

The design problems of a heat network that can supply both heating and domestic hot water to eight public buildings in the town of Villablino have been studied. For this purpose, the



different elements of the system have been modeled and the design variables that affect the performance and viability of the system have been analyzed.

Among the modeling carried out are those of the generation system, consisting of two chillers arranged in series and counterflow, a shell and tube heat exchanger for mine water and a thermal reservoir that accumulates the mine water and serves to regulate the system. Also, the heat network piping that carries the water from the generation room to the customers has been modeled, analyzing its diameter, typology and insulation, and looking at the effect of these parameters on the technical feasibility of the system. The implementation of the heat network equipment in the technical rooms of each of the clients has been studied, detailing the necessary connections to supply geothermal energy to the existing heating circuits.

Finally, an economic analysis of the Villablino heat network has been developed.



## ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS   | iii |
| RESUMEN   | v   |
| ABSTRACT  | vii |
| 1. INTRODUCCIÓN   | 2   |
| 1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN  | 2   |
| 1.2. OBJETIVOS  | 7   |
| 1.3. EL VALLE DE LACIANA  | 8   |
| 2. ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA  | 13  |
| 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS DE MINA                               | 13  |
| 2.2. PROBLEMAS AMBIENTALES DERIVADOS DE LAS AGUAS DE MINA               | 18  |
| 2.2.1. Problemas ambientales generales de la minería del carbón         | 18  |
| 2.2.2. Problemas ambientales específicos de las aguas de mina           | 19  |
| 2.2.3. Legislación  | 21  |
| 2.2.4. Ejemplos   | 21  |
| 2.3. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE MINA PARA USOS CONVENCIONALES      | 23  |
| 2.3.2. Uso doméstico  | 23  |
| 2.3.3. Uso industrial   | 24  |
| 2.3.4. Uso agrario  | 24  |
| 2.3.5. Uso en ganadería   | 28  |
| 2.4. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE MINA COMO RECURSO ENERGÉTICO       | 29  |
| 2.4.2. Aprovechamiento de las aguas de mina como recurso geotérmico     | 29  |
| 2.4.3. Aprovechamiento de las aguas de mina como recurso hidroeléctrico | 50  |



|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.     | ÁREA DE ESTUDIO  | 56  |
| 3.1.   | CONTEXTO CLIMÁTICO                                       | 57  |
| 3.1.1. | Estudios climatológicos predictivos del Valle Lacia      | 57  |
| 3.1.2. | Datos tomados de AEMET                                   | 64  |
| 3.1.3. | Evaluación de datos meteorológicos                       | 64  |
| 3.2.   | CONTEXTO GEOLÓGICO                                       | 66  |
| 3.2.1. | Estratigrafía  | 70  |
| 3.2.2. | GEOMORFOLOGIA  | 74  |
| 3.2.3. | TECTÓNICA  | 74  |
| 3.2.4. | GEOTECNIA  | 76  |
| 3.3.   | CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO                                  | 77  |
| 3.4.   | SÍNTESIS MINERA  | 78  |
| 3.5.   | CONTEXTO SOCIOECONÓMICO                                  | 81  |
| 4.     | CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE MINA DEL VALLE LACIANA   | 85  |
| 4.1.   | METODOLOGÍA  | 85  |
| 4.1.1. | Diseño de la red de muestreo                             | 86  |
| 4.1.2. | Toma de muestras   | 88  |
| 4.2.   | CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA                           | 95  |
| 4.2.1. | Resultados de la campaña de muestreo                     | 95  |
| 4.2.2. | Composición química de las aguas de mina del Valle Lacia | 105 |
| 4.3.   | NATURALEZA CORROSIVA O INCRUSTANTE DE LAS AGUAS          | 108 |
| 4.4.   | VARIACIÓN DE CAUDALES DE AGUA EN ÉPOCA HÚMEDA Y SECA     | 116 |
| 5.     | ESTUDIO Y COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS EXISTENTES       | 125 |
| 5.1.   | REVISIÓN DE METODOLOGÍAS EXISTENTES                      | 126 |
| 5.1.1. | WSM  | 126 |
| 5.1.2. | WPM  | 126 |
| 5.1.3. | AHP  | 127 |
| 5.1.4. | PROMETHEE  | 128 |



|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.1.5. | ELECTRE  | 129 |
| 5.1.6. | TOPSIS   | 130 |
| 5.1.7. | MADM difusos   | 130 |
| 5.2    | SELECCIÓN DE METODOLOGÍA                               | 131 |
| 5.3    | METODOLOGÍA DEL PROCEDIMIENTO JERÁRQUICO (AHP)         | 133 |
| 5.4    | DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS                             | 134 |
| 5.4.1  | Aprovechamiento geotérmico (circuito abierto).         | 134 |
| 5.4.2  | Aprovechamiento geotérmico (circuito cerrado).         | 135 |
| 5.4.3  | Aprovechamiento hidroeléctrico (salto hidroeléctrico). | 136 |
| 5.4.4  | Aprovechamiento hidroeléctrico (microturbinas).        | 136 |
| 5.5    | ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS                           | 137 |
| 5.5.1  | Definición de criterios                                | 137 |
| 5.5.2  | Definición de subcriterios                             | 138 |
| 5.5.3  | Ponderación de criterios y subcriterios                | 143 |
| 5.6    | SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA MÁS VENTAJOSA                  | 153 |
| 5.6.1  | Discusión de valores de subcriterios                   | 153 |
| 5.6.2  | Valoración de alternativas                             | 166 |
| 5.7    | PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS                           | 186 |
| 6.     | ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO             | 188 |
| 6.1    | METODOLOGÍA DE ANÁLISIS UTILIZADA                      | 188 |
| 6.2    | DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS                             | 188 |
| 6.3    | ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS                           | 189 |
| 6.3.1  | Definición de criterios                                | 189 |
| 6.3.2  | Definición de subcriterios                             | 189 |
| 6.3.3  | Ponderación de criterios y subcriterios                | 195 |
| 6.4    | SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA MÁS VENTAJOSA                  | 200 |
| 6.4.1  | Discusión de valores de subcriterios                   | 200 |
| 6.4.2  | Valoración de alternativas                             | 208 |



|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 6.5    | PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO | 230 |
| 7.     | IMPLANTACIÓN Y DISEÑO                                      | 232 |
| 7.1.   | INTRODUCCIÓN   | 232 |
| 7.2.   | ESTUDIO DE DEMANDA TÉRMICA                                 | 233 |
| 7.2.1. | IES Obispo Argüelles                                       | 234 |
| 7.2.2. | Ayuntamiento de Villablino                                 | 242 |
| 7.2.3. | Casa de la cultura de Villablino                           | 246 |
| 7.2.4. | Polideportivo de Villablino                                | 251 |
| 7.2.5. | Colegio público San Miguel                                 | 256 |
| 7.2.6. | Centro de salud Valle de Laciana                           | 260 |
| 7.2.7. | Estudio de la demanda del sistema                          | 264 |
| 7.3.   | RECURSO GEOTÉRMICO DEL AGUA DE LA BOCAMINA DE CALDERÓN     | 279 |
| 7.3.1. | Parametrización  | 279 |
| 7.3.2. | Medición in situ del caudal                                | 279 |
| 7.4.   | SISTEMA DE GENERACIÓN                                      | 291 |
| 7.4.1. | Enfriadoras  | 291 |
| 7.4.2. | Intercambiador de calor de agua de mina                    | 314 |
| 7.4.3. | Depósito térmico   | 329 |
| 7.5.   | SISTEMAS DE CONDUCCIONES Y CIRCUITOS HIDRÁULICOS           | 331 |
| 7.5.1. | Conducciones   | 332 |
| 7.5.2. | Circuito de distribución                                   | 333 |
| 7.5.3. | Circuito de condensación                                   | 363 |
| 7.5.4. | Circuito de evaporación                                    | 369 |
| 7.5.5. | Circuito de agua de mina                                   | 375 |
| 7.5.6. | Separador hidráulico                                       | 380 |
| 7.5.7. | Zanjas   | 384 |
| 7.6.   | SALAS TÉCNICAS   | 387 |



|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 7.6.1. | Diseño de las subestaciones de intercambio _____        | 387 |
| 7.6.2. | Diseño de los intercambiadores de calor de placas _____ | 388 |
| 7.6.3. | Implantación de los equipos en las salas técnicas _____ | 411 |
| 7.7.   | ESTUDIO ECONÓMICO _____                                 | 423 |
| 8.     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____                    | 426 |
| 9.     | REFERENCIAS _____                                       | 430 |
| A1.    | DOCUMENTACIÓN GRÁFICA _____                             | 460 |
| A2.    | FICHAS DE PUNTOS DE MUESTREO _____                      | 463 |
| A3.    | INFORMES DE CÁLCULO _____                               | 473 |
| A4.    | ESTUDIO ECONÓMICO _____                                 | 486 |







# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La presente tesis doctoral tiene como finalidad desarrollar una investigación sobre un recurso energético renovable y ecológico que pueda hacer competencia, en determinadas situaciones, a los sistemas energéticos tradicionales de origen fósil como el carbón o el gas. La aplicación práctica de la investigación pretende además proporcionar una alternativa de desarrollo a una zona desfavorecida económica, industrial y demográficamente.

El recurso investigado es el del agua de mina, en concreto, el agua de las minas de carbón abandonadas del Valle Laciana, también llamado comarca de Laciana o municipio de Villablino. Esta región se sitúa al Noroeste de la provincia de León, en España, lindando al Norte y al Oeste con el Principado de Asturias, al sur con las comarcas leonesas del Bierzo y de Omaña y al Este con la comarca de Babia.

La minería del carbón ha sido el motor industrial del Valle Laciana desde principios del siglo XX. La empresa Minero Siderúrgica de Ponferrada ha sido la principal explotadora de las capas de carbón del valle promocionando la apertura de hasta doce instalaciones mineras en la comarca. Las instalaciones existentes en la comarca de Laciana, atendiendo a su tipología se recogen en la tabla nº1.

| Minas de montaña | Pozos mineros | Minas a cielo abierto |
|------------------|---------------|-----------------------|
| Paulina          | Pozo María    | Nueva Julia           |
| Calderón         |               | Fonfría               |
| Peñas Bolsada    |               | Carrasconte           |
| Lumajo           | Pozo Calderón | Feixolín              |
| Carrasconte      |               |                       |
| Feixolín         |               |                       |

Tabla nº1. Instalaciones existentes en el Valle Laciana.

El aprovechamiento de las aguas de estas minas como recurso energético supondría un triple beneficio, un beneficio ambiental, un beneficio energético y un beneficio social.

El beneficio ambiental radica en la mejora de la situación ambiental que se está viviendo actualmente en el Valle Laciana. Las aguas de las minas estudiadas están brotando incontroladamente de las bocaminas afectando consecuentemente al medio donde son vertidas (Johnson 2003).



Los vertidos de agua de mina, dependiendo de su naturaleza, pueden llegar a ser un problema medioambiental muy importante debido a que pueden llegar a introducir en los medios fluviales y en los acuíferos cercanos sustancias potencialmente tóxicas tales como sulfatos o metales pesados (Costa, M. C., Martins, M., Jesus, C. & Duarte 2008).

Mientras que las minas se encuentran en explotación, es necesario el bombeo del agua encontrada en los frentes de trabajo para poder mantener la producción. A pesar de existir casos en los que las aguas bombeadas durante la producción de las minas ya han contaminado los ecosistemas cercanos (Hamill 1980), normalmente estos vertidos están controlados, tratados y cumplen con los estándares ambientales necesarios. Sin embargo, una vez las minas han sido cerradas y se para la producción, las bombas de desagüe que se han utilizado durante la vida útil de la mina son apagadas y el agua subterránea contaminada puede anegar las minas y producir vertidos incontrolados (Hallberg, K. B. & Johnson 2005).

Ha habido muchos casos documentados de minas de carbón abandonadas, como es el caso de las minas del Valle Laciana, que han provocado contaminación en los ecosistemas cercanos (Younger 2004). Estos vertidos contaminantes pueden ser muy duraderos y producirse durante varios años después del cierre de las minas (Younger, P.L., Banwart, S.A. & Hedin 2002), por ello es imprescindible poder desarrollar tecnologías que ayuden a atenuar los efectos negativos de estas aguas.

Normalmente los efectos más nocivos se pueden ver inmediatamente después del cierre de la mina. Posteriormente, la concentración de sustancias contaminantes disminuye de forma paulatina hasta estabilizarse (Wood, S.C., Younger, P.L. & Robins 1999). A pesar de la disminución de la concentración de estas sustancias en el tiempo, a menudo los valores de concentración estabilizados exceden la carga contaminante admisible en el medio receptor (Stoertz, M.W., Hughes, M.L. 2001).

Al poner en valor los vertidos incontrolados del Valle Laciana se podrían reducir sus efectos contaminantes sobre los ríos de la comarca, en especial sobre el río Sil y sus afluentes, el río de Orallo, el arroyo de la Fleitina y el arroyo de la Braña.

El beneficio energético radica en la potenciación de una energía limpia y renovable en comparación con los combustibles fósiles que se siguen utilizando en la comarca, en especial el carbón, legado de los tiempos de bonanza en los que la minería del carbón era el eje sobre el que giraba toda la actividad del valle.

El agua subterránea almacenada en el embalse minero puede ser utilizada en numerosas aplicaciones tales como aplicaciones energéticas, agua de proceso en instalaciones industriales, consumo humano o animal, agua caliente sanitaria, riego, etc. Sin



embargo, la presente tesis doctoral se centra en el aprovechamiento de las aguas de mina como recurso energético.

Existe una tendencia cada vez mayor encaminada a impulsar proyectos relacionados con el aprovechamiento de estas aguas motivada por las directrices europeas sobre energía y recursos renovables (Europeo 2018, entre otras).

Hasta la fecha, el uso energético más desarrollado para las aguas de minas abandonadas ha sido el geotérmico, aprovechando el gradiente térmico del agua subterránea.

Las minas abandonadas suponen una gran oportunidad como fuente de geotermia de baja entalpía debido a la acumulación de agua que se da en sus galerías una vez se ha recuperado el nivel freático y se han visto anegadas. La temperatura del agua subterránea está expuesta a menos variaciones térmicas que el agua superficial y además tiene un gradiente térmico de 3°C cada 100 metros de profundidad (IGME 2008).

El hecho de evitar la perforación del terreno para alcanzar una profundidad en la que el gradiente térmico suponga una diferencia de temperatura importante es uno de los aspectos más atractivos de la utilización geotérmica de este recurso. En el caso de los pozos mineros, se puede utilizar el propio pozo para acceder a agua a gran profundidad y a elevada temperatura, aprovechando la perforación ejecutada mientras la mina estaba en explotación y ahorrando así una considerable suma de dinero en la inversión inicial.

Se han llevado a cabo numerosas iniciativas y estudios en los últimos 15 años en Europa para desarrollar instalaciones que aprovechen instalaciones de minas de carbón abandonadas como plantas de geotermia de baja entalpía (Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014). Sin embargo, hay pocos proyectos que se hayan llevado a cabo y son escasas las instalaciones que estén en funcionamiento en todo el mundo (Preene, M. & Younger 2014).

Alguno de los proyectos más notables llevados a cabo es el complejo geotérmico de Heerlen en Holanda que se inauguró en 2008 y que abastece de agua caliente a unas trescientas casas en invierno mientras que en verano las refrigera (Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014).

En Reino Unido, Alemania, Canadá y Estados Unidos también se han ejecutado este tipo de instalaciones, como por ejemplo en Springhill en Nueva Escocia (Jessop, A. M., Macdonald, J. K. & Spence 1995), Canadá, Park Hills, (Missouri, Estados Unidos) o Shettleston, Escocia (Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop 2004).



En nuestro país el principal promotor de este tipo de instalaciones ha sido la empresa Hulleras del Norte, S.A., propietaria de la mayoría de las minas de la cuenca carbonífera asturiana. Durante los últimos años se ha realizado un esfuerzo importante por dotar de provecho industrial a las instalaciones clausuradas encontrando en el potencial geotérmico de sus aguas un posible sistema de aprovechamiento (Jardón 2013). Actualmente se encuentran ejecutados un sistema de District Heating que regula la temperatura del Hospital Álvarez Buylla de Mieres y otro que regula el Centro de Investigación y residencia de estudiantes de la Universidad de Oviedo en el Campus de Mieres, ambos con agua proveniente del pozo Barredo (Loredo, J., Ordóñez, A., Jardón, S. & Álvarez 2011).

Estos ejemplos suponen la prueba de que el aprovechamiento geotérmico de las aguas de minas abandonadas puede representar un nicho de desarrollo e inversión muy interesante para zonas que hayan perdido su principal actividad industrial con la clausura de sus minas.

En esta tesis doctoral se pretenden buscar nuevas aplicaciones energéticas a parte de la convencionalmente extendida antes señalada. Entre ellas destaca el uso del agua de mina como recurso hidroeléctrico, utilizando las minas como embalse en centrales hidroeléctricas reversibles.

El beneficio social radica precisamente en potenciar un sistema industrial alternativo que mantenga el tejido industrial local degradado por la pérdida del principal motor económico de la región.

Las diversas crisis y la política energética nacional han mermado la capacidad empresarial de la región de estudio resultando en el cierre prácticamente total de las minas de carbón en 2010.

Actualmente todas las minas de este valle se encuentran abandonadas, por tanto, la vida industrial del valle está cercana a su fin a no ser que se fomenten otro tipo de actividades que puedan poner en valor las infraestructuras que se encuentren en el mismo.

La parada del motor industrial de la comarca ha derivado en una profunda crisis económica, social y demográfica debido a que la población joven es obligada a trasladarse a otras zonas debido a la falta de empleo en el valle. Según los datos del Instituto Nacional de Estadística la población del municipio de Villablino fue de 8.690 habitantes en 2019 mientras que en el año 2.000 era de 14.169 habitantes.

Iniciativas como la propuesta en esta tesis doctoral pueden dotar a la comarca de nuevos incentivos, tanto empresariales como humanos, para mantener la actividad económica y social en la región.



La trascendencia que el estudio de este tipo de alternativas puede tener en la forma de vida de las personas y en el tejido industrial del Valle Laciana, así como los beneficios ambientales y energéticos antes señalados, suponen una justificación más que suficiente a los esfuerzos destinados a la elaboración de la presente tesis.

La estructura del documento se presenta someramente a continuación. En primer lugar, se expone un capítulo introductorio en el que se describen los antecedentes y motivación del trabajo, así como, sus objetivos. También se incluye en este primer capítulo una reseña sobre la historia de la Comarca de Laciana y su interrelación con la industria minera.

En el segundo capítulo se recoge un estado actual de la técnica de los sistemas disponibles para el aprovechamiento energético de las aguas de mina, tanto de las tecnologías convencionales como puede ser el aprovechamiento geotérmico, como de tecnologías alternativas y novedosas. En este apartado se incluye también la problemática ambiental relacionada con las aguas de mina y la problemática intrínseca de los aprovechamientos de agua de mina.

En el tercer capítulo se incluye una recopilación de información sobre el área de estudio incluyendo un estudio climatológico, un estudio geológico, un repaso histórico de la comarca de Laciana, haciendo hincapié en su historia minera, y, por último, un análisis de la socioeconomía de la región.

En el cuarto capítulo se detalla la campaña de caracterización llevada a cabo para determinar las propiedades de las aguas de mina en nueve puntos de muestreo seleccionados. Se aprovechará para hacer una descripción pormenorizada de la comarca en aquellos aspectos que afecten para conocer las propiedades de sus aguas.

En el quinto capítulo se incluye una evaluación comparativa de las tecnologías existentes para ver cuál es la más eficiente tomando como referencia una mina tipo. Se utilizarán criterios económicos, medioambientales y funcionales para elaborar una matriz de decisiones que arroje resultados sobre las ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías

El sexto capítulo se buscará la aplicación de la tecnología más beneficiosa identificada en el capítulo V y se aplicará en las minas del Valle de Laciana definiendo actuaciones concretas. Para llevar a cabo este estudio de aplicación se deberán utilizar todos los aspectos singulares de cada una de las minas escogidas como objeto de estudio.

En el séptimo capítulo se realizará un estudio de implantación de las opciones mejor valoradas en el quinto capítulo. Será un estudio detallado que reflejará las necesidades para poder llegar a la implantación de la tecnología, las dificultades y puntos críticos que pudieran



aparecer en la implantación, reflejará un estudio económico completo de las opciones elegidas y por último se realizarán recomendaciones a seguir para que el estudio teórico se convierta en una realidad.

En los capítulos octavo y noveno se recogen las conclusiones de la tesis y la bibliografía de la misma respectivamente.

Por último, se incluyen tres anexos correspondientes a la documentación gráfica, el presupuesto estimado y los informes de cálculo.

## 1.2. OBJETIVOS

A continuación, se enumeran los objetivos que se persiguen con la elaboración de la presente tesis doctoral:

1. Estudiar y analizar pormenorizadamente las técnicas existentes para aprovechar las aguas de mina como recurso energético.
2. Analizar el estado actual del sistema de minas del valle de Laciana obteniendo un conocimiento exhaustivo del mismo.
3. Realizar una campaña analítica de muestreo y análisis de las aguas que rebosan en las minas en la comarca de Laciana, con determinación in situ de los parámetros físicos y análisis de laboratorio de los parámetros químicos con obtención de la concentración de aniones mayores.
4. Realizar una comparativa justificada de los distintos sistemas tecnológicos para aprovechar las aguas de mina como recurso energético, identificando sus bondades e inconvenientes y aplicándolo a una mina tipo.
5. Llevar a cabo un análisis de alternativas de posibles aprovechamientos energéticos del agua de las minas del Valle Laciana. Para ello se tendrá en cuenta, entre otros aspectos, la tipología de minas encontradas en la región, su proximidad a núcleos de población y la caracterización de las aguas de cada uno de los puntos estudiados.
6. Estudio de implantación de la alternativa más ventajosa incluyendo el diseño teórico de la actuación, evaluando los beneficios y los problemas de implantación y realizando un estudio económico completo de la misma.





### 1.3. EL VALLE DE LACIANA

El Valle Laciana es un territorio de la Montaña Occidental leonesa situado en la zona noroccidental de la provincia. Este territorio recibe diversos nombres indistintamente, Valle Laciana, Valle de Laciana, Comarca de Laciana o Municipio de Villablino, ya que, en este caso, la comarca de Laciana cuenta con un único municipio, el de Villablino. Esta región está limitada al norte, al noroeste y al oeste por los concejos asturianos de Somiedo, Cangas de Narcea y Degaña, respectivamente, al este, sureste y suroeste, colinda con las comarcas leonesas de Babia, Omaña y Ribas del Sil.

La Comarca de Laciana cuenta con una extensión territorial de 228,23 km<sup>2</sup> y su altitud oscila entre los 980 metros medidos en la Presa de las Rozas, al Sur de Villablino, y los 2.194 del Cornón de Peñarrubia situado en la zona Norte del municipio.

La capital administrativa de la comarca es la población de Villablino cuyo emplazamiento se sitúa en la zona central de la región. Laciana cuenta con catorce entidades de población conservadas desde la Edad Media (a excepción del pueblo de San Miguel de Laciana que fue anexionado a Villablino en la década de 1950) las cuales se enumeran a continuación:

- Caboalles de Abajo, Caboalles de Arriba, El Villar de Santiago, Llamas, Lumajo, Orallo, Rabanal de Arriba, Rabanal de Abajo, Rioscuro, Robles, Sosas, Villablino, Villaseca y Villager.



Figura nº1. Vista de la localidad de Villablino en el Valle Laciana



Figura nº2. Brañas del Valle Laciana

En la figura nº1 se puede observar la localidad de Villablino con el Cuetonidio al fondo (1.773 metros de altura) y el pantano de Las Rozas a la derecha. En la figura nº2 se refleja un tipo de construcciones muy común en el Valle Laciana, las cabañas de las brañas, que se utilizaban como vivienda de verano por los pastores mientras dejaban al ganado pastar libremente por los praderíos de la zona.

El Valle Laciana contaba con una población de 8.690 habitantes en 2019, mientras que su capital, Villablino, aglomeraba una población de 5.002 habitantes. Esta población no tiene nada que ver con los 15.993 habitantes con los que contaba el Valle en 1989 justo antes del declive de la Minero Siderúrgica de Ponferrada (MSP). Esta empresa se dedicaba a la extracción de carbón en el Valle, actividad que monopolizaba completamente la economía de la región, dando empleo a más del 75% de la población directamente e indirectamente a otro 20% (Maurin M. 1989). La cuenca de Villablino ha sido la principal cuenca minera de León y una de las más importantes a nivel nacional. Además, conserva la mayor reserva de hulla a nivel nacional, teniendo existencias aún mayores que la Cuenca Central Asturiana. El tipo de carbón que aquí se encuentra contiene una variada proporción de materias volátiles, de 6 a 24% de media y con extremos de 3 a 30%, lo que permite obtener desde antracitas hasta hullas grasas, pasando por carbones magros y antracitosos o por hullas de vapor y coquizables (A. Herrero 2013).

En la figura nº3 se muestra un mapa físico de la comarca de Laciana donde se señalan los principales núcleos de población de la región, los ríos, las carreteras y los picos más destacados.



Figura nº3. Mapa del Valle Laciana.

Topográficamente, la comarca de Laciana forma una depresión rodeada de altos picos cuyos máximos representantes son al Noreste el Muxivén (2.032 m) y el Cornón de Peñarrubia (2.194 m), mientras que al Noroeste se encuentra el Cueto de Arbas (2.007 m). En la zona meridional se encuentran el Alto de los Cerezales (1.614 m), el Represo (1.730 m), el Miro (1.878 m) y Matalachana (1.731 m), al Sureste se encuentra el Nevadín con 2.082 metros y el Alto de Torrecilla (1.709). Justo al Sureste de Villablino se encuentra el Cueto Nidio (1.773) el cual se puede ver al fondo en la Figura nº1. Este anillo montañoso se ve interrumpido por algunos puertos y collados como el de Leitariegos (1.525 m) o Cerrredo (1.359 m) al Noroeste, al Sur mediante la conexión con Ponferrada y al Oeste mediante la conexión de Babia y Omaña.



El valle principal se abre longitudinalmente en dirección Este-Oeste durante aproximadamente 10 km; en su zona más ancha cuenta con hasta 3 km. de anchura coincidiendo con la vaguada de Villablino y el embalse de Las Rozas. En los pueblos de Caboalles de abajo y de Rioscuro el Valle forma dos lenguas en cada uno que se abren hacia los puertos de Leitariegos y Cerredo, en el caso del Caboalles y hacia las comarcas de Babia y Omaña en el caso de Rioscuro.

El río principal del Valle Laciana es el Sil, que nace en la Peña Orniz, en la Comarca de Babia, y que llega hasta Laciana a través de la garganta de las Palomas (Figura nº4) y por Villaseca. Al sur de Villablino sus aguas se estancan en el embalse de Las Rozas (Figura nº1).



Figura nº4. Garganta de las Palomas en la comarca de Babia.

El conjunto del Valle se sitúa a una altura media de 1.200 m. siendo la población de Villablino la que cuenta con la menor altitud (menos de 1.020 m.) y la de Lumajo la que cuenta con mayor altitud (1.377 m) (Revuelta, J. F., De la Puente, T., Egúren, V. G. & Roa 1999).



## CAPÍTULO II. ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA



## 2. ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA

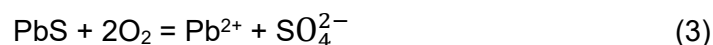
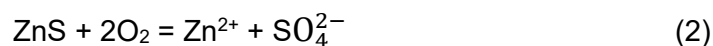
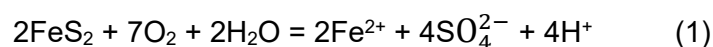
Como inicio del desarrollo de esta tesis se presenta en este capítulo el estado actual de la técnica del aprovechamiento energético de las aguas de mina. Para ello se ha empezado tratando algunos temas generales al respecto de la naturaleza, las características y los problemas que generan este tipo de aguas.

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS DE MINA

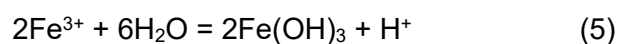
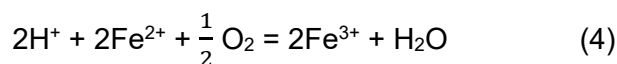
En cualquier estudio de aprovechamiento es necesario primero conocer las propiedades del elemento que se quiere aprovechar. Las propiedades de las aguas de mina varían mucho dependiendo del tipo de mina, de las condiciones geológicas del entorno e incluso del tiempo que llevan en contacto con las paredes de la mina (Akcil, A. & Koldas 2006; Wieber, G. & Pohl 2008).

A pesar de la variabilidad presente en este tipo de aguas, debido a sus condicionantes locales, se ha hecho una recolección de características generales de las aguas de las minas de carbón abandonadas de manera que suponga un punto de partida y de contraste para la caracterización de las aguas de las minas del Valle Llaciana.

La mayoría de las explotaciones de carbón están caracterizadas por contener sulfuros tales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), la galena ( $\text{PbS}$ ) o la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ). Estos sulfuros tienden a oxidarse cuando entran en contacto con agua u oxígeno, lo cual provoca la liberación de metales, sulfatos y acidez (caso de la pirita) (Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop 2004). En las siguientes ecuaciones se pueden ver las reacciones químicas que tienen lugar cuando se producen estas situaciones:



Cuanto mayor sea la oxidación del ion ferroso  $\text{Fe}^{2+}$  a ion férrico  $\text{Fe}^{3+}$  y posteriormente la hidrólisis del ión férrico, mayor será la acidez del agua de mina:



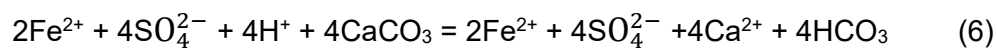


El ion férrico precipita en forma de hidróxido férrico tal y como se ve en la ecuación (5) dejando una capa anaranjada en los lugares donde precipita. Esta capa se suele llamar comúnmente en la industria minera “ocre” o limonita (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).

La concentración de estos minerales aumenta si el tiempo que las aguas subterráneas están en contacto con las cavidades subterráneas es prolongado y si el flujo a través de las mismas es grande (Hassan 2016).

Las ecuaciones aquí mostradas justifican la aparición de aguas ácidas cuando se inundan minas de carbón o de metales, y aparecen en consecuencia fugas o reboses de agua de mina hacia el medio hídrico (Banks, D., Younger, P. L., Arnesen, R.T., Iversen, E. R. & Banks 1997).

Si se continúa desarrollando la ecuación (1) en presencia de carbonato cálcico se produce la neutralización del ácido.



Esta ecuación deja ver que, aún existiendo sulfuros metálicos que incentivan el aumento de la acidez del agua, en caso de haber presencia de carbonatos, las aguas se pueden neutralizar e incluso revertir su naturaleza de ácidas a básicas o de corrosivas a incrustantes (Akciil, A. & Koldas 2006; Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).

Esto deja de manifiesto la importancia del estudio particularizado de las aguas de mina, ya que la naturaleza de los minerales presentes en las explotaciones afecta en gran medida la caracterización de las mismas.

Se debe destacar que en general las aguas de las minas de minerales metálicos son más agresivas que las aguas de las minas de carbón y que las minas que han sido recientemente inundadas generan vertidos de agua de peor calidad que las que llevan abandonadas un tiempo prolongado (Banks, D., Younger, P. L., Arnesen, R.T., Iversen, E. R. & Banks 1997).

A continuación, se presenta una clasificación de las aguas de mina en función de su pH (Lottermoser 2007; Morin, K. A. & Hutt 1997):

- Extremadamente ácida (pH<1): Se produce en las que el macizo explotado está muy cargado de piritita y la proporción de materiales amortiguadores es despreciable.
- Ácida (pH<5,5): Se trata del drenaje de mina más común (T. Herrero 2014). Se produce por la oxidación de sulfuros (pirita, galena o esfalerita) lo que provoca, además de la acidez del agua, la liberación de metales pesados y sulfatos. Cabe destacar que en este tipo de drenajes se suelen encontrar altas concentraciones de sulfatos (>1000



mg/l) y de Fe y Al (>100 mg/l), así como una menor concentración de Cu, Cr, Ni, Pb y Zn (>10 mg/l) (T. Herrero 2014) .

- Neutra a alcalina (pH de 6 a 10): Cuando las reacciones de producción (1) y (5) y amortiguación de acidez (6) se compensan, se pueden encontrar drenajes de aguas neutras e incluso alcalinas. La alcalinidad se produce debido a la disolución de carbonatos, óxidos alcalinos, hidróxidos y silicatos (T. Herrero 2014). Se pueden encontrar los mismos metales y sulfatos mencionados en el caso de los drenajes ácidos en concentraciones elevadas, sin embargo, en este tipo de drenajes es común la presencia de bicarbonatos y una concentración importante de Ca, Mg y Na.
- Salina: Se produce cuando el pH de los drenajes fluctúa ostensiblemente.

En el caso de las minas de carbón, es bastante corriente encontrar tipos de drenajes ácidos, neutros o incluso salinos, siendo en general los más comunes los ácidos (T. Herrero 2014). Se ha hecho una recopilación bibliográfica de los valores de pH de los drenajes de diversas minas de carbón en todo el mundo con el fin de detectar la tendencia en cuanto a la naturaleza de los mismos en este tipo de minas (tabla nº2):

| Nombre      | Tipo de mina               | Localización      | Tipo de agua de mina | pH      | Referencia                               |
|-------------|----------------------------|-------------------|----------------------|---------|--|
| Swatara     | Mina de carbón (Antracita) | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 3,5-6,5 | (Cravotta 2010)                          |
| Howe Bridge | Mina de carbón             | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 4,5-6,1 | (Demchak, J., Morrow, T. & Skousen 2001) |
| Filson 1    | Mina de carbón             | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 3,4-3,9 | (Demchak, J., Morrow, T. & Skousen 2001) |
| Sommerville | Mina de carbón             | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 3,4-3,5 | (Demchak, J., Morrow, T. & Skousen 2001) |
| McKingley   | Mina de carbón             | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 4,0-4,4 | (Demchak, J., Morrow, T. & Skousen 2001) |
| -           | Mina de Carbón             | Pensilvania, EEUU | Ácida                | 2,9     | (Hammarstrom, J. M., Sibrell, P. L.)     |





|              |                 |                               |                   |           |   |
|--------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|-----------|---|
|              |                 |                               |                   |           | & Belkin 2003)  |
| Kimbleworth  | Mina de Carbón  | Durham, Reino Unido           | Neutra o alcalina | 6,85-7,09 | (Jarvis and Younger 2001)                                 |
| Shettleston  | Mina de Carbón  | Glasgow, Reino Unido          | Neutra o alcalina | 7,14      | (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017) |
| Caphouse     | Mina de Carbón  | Condado de York, Reino Unido  | Neutra o alcalina | 6,87      | (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017) |
| Markham      | Mina de Carbón  | Condado de Derby, Reino Unido | Neutra o alcalina | 7,33      | (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017) |
| Tan-y-Garn   | Mina de Carbón  | Gales del Sur, Reino Unido    | Neutra o alcalina | 6,18      | (Taylor, K., Banks and Watson 2016)                       |
| Bullhouse    | Mina de Carbón  | Reino Unido                   | Neutra o alcalina | 5,9       | (Johnson 2003)  |
| Ynysarwed    | Mina de Carbón  | Reino Unido                   | Neutra o alcalina | 6,2       | (Johnson 2003)  |
| Outlands     | Mina de Carbón  | Reino Unido                   | Ácida             | 5,5       | (Johnson 2003)  |
| Sverdrupbyen | Mina de Carbón  | Noruega                       | Ácida             | 2,7       | (Johnson 2003)  |
| -            | Minas de Carbón | Macizo Renano, Alemania       | Neutra o alcalina | 6,0-8,0   | (Wieber, G. & Pohl 2008)                                  |
| Heinrich     | Minas de Carbón | Essen - Heisingen, Alemania   | Neutra o alcalina | 6,0-8,0   | (Wieber, G. & Pohl 2008)                                  |
| Zollverein   | Mina de Carbón  | Essen - Katernberg, Alemania  | Neutra o alcalina | 6,0-8,0   | (Wieber, G. & Pohl 2008)                                  |



|                      |                 |                  |                   |      |   |
|----------------------|-----------------|------------------|-------------------|------|---|
| Pozo Barredo         | Mina de Carbón  | Asturias, España | Neutra o alcalina | 7,9  | (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016)          |
| Pozo Figaredo        | Mina de Carbón  | Asturias, España | Neutra o alcalina | 7,6  | (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016)          |
| Mina montaña Mariana | Mina de Carbón  | Asturias, España | Neutra o alcalina | 7,9  | (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016)          |
| Pozo San José        | Mina de Carbón  | Asturias, España | Neutra o alcalina | 7,1  | (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016)          |
| Minas cuenca Tremor  | Minas de Carbón | León, España     | Neutra o alcalina | 8,1  | (Villa, E., Robles, J. A., Alonso and Vidal 2008) |
| Minas cuenca Boeza   | Minas de Carbón | León, España     | Neutra o alcalina | 7,8  | (Villa, E., Robles, J. A., Alonso and Vidal 2008) |
| Bocamina Tremor      | Mina Carbón     | León, España     | Ácida             | 3,11 | (T. Herrero 2014)                                 |

Tabla nº2. Recopilación bibliográfica de la naturaleza de drenajes de minas de carbón

De la recopilación bibliográfica realizada se puede extraer la conclusión de que el tipo de drenaje más común es el de aguas neutras o alcalinas. Esta percepción es especialmente acentuada en el norte de España donde se ubican las minas del Valle Laciana. En regiones cercanas tales como Asturias o El Bierzo se han encontrado drenajes de agua de mina de naturaleza neutra o alcalina. Cabe destacar que los resultados encontrados sobre las minas de la cuenca del río Tremor varían dependiendo del estudio consultado.

Dependiendo de los puntos donde se realicen los muestreos el pH de las aguas puede variar. Eduardo Villa tomó datos de las aguas en varios puntos de las cuencas mineras de los ríos Tremor y Boeza en 2.008 (Villa, E., Robles, J. A., Alonso & Vidal 2008), encontrando aguas mayoritariamente neutras o alcalinas. Teresa Herrero (2014) llegó a resultados similares, en su tesis doctoral (T. Herrero 2014), ejecutando los muestreos en los ríos. Sin embargo, al tomar muestras de zonas cercanas a las bocaminas se comprobó la presencia de aguas ácidas, por ello es necesario estudiar directamente las aguas que salen de las mismas.



Como conclusión del análisis bibliográfico de las características generales de los drenajes de las minas de carbón se destaca la necesidad de estudiar pormenorizadamente cada caso, evaluando los parámetros fisicoquímicos de las bocaminas de estudio, pudiendo ser las aguas de la zona tanto ácidas, como neutras o alcalinas.

## **2.2. PROBLEMAS AMBIENTALES DERIVADOS DE LAS AGUAS DE MINA**

### **2.2.1. Problemas ambientales generales de la minería del carbón**

La minería del carbón se ha considerado clásicamente como una actividad agresiva con el medio ambiente, que provoca notorios efectos sobre el mismo. Se define el impacto ambiental de una actividad como las diferencias producidas en el medio natural entre el momento en el que comienza la actividad, y el momento en el que cesa (Carretero-León, M<sup>a</sup> I. & Pozo-Rodríguez 2007).

La gran cantidad de residuos que genera la industria minera y la naturaleza de los mismos, hace que este tipo de industria esté considerada como una de las más peligrosas para el medio ambiente en términos de contaminación (Mendiguchía 2005). Los componentes ácidos de sus residuos y los metales pesados que abundan en sus vertidos resultan altamente tóxicos para organismos vivos. Además, sus efectos no se mantienen únicamente en la zona de explotación, sino que pueden aparecer efectos dañinos lejos de la fuente contaminante.

Se pueden clasificar los tipos de contaminación de la minería como sigue (Moore, J. N. & Luoma 1990):

1. Residuos producidos durante la explotación y depositados en las inmediaciones de los terrenos explotados.
2. Afecciones producidas sobre la atmósfera, ríos, aguas subterráneas, suelos, etc., como consecuencia del transporte de los contaminantes generados en el lugar de explotación a través de corrientes de aguas o de la atmósfera.
3. Removilización de contaminantes lejos de la mina.

El impacto ambiental de la minería no se circunscribe exclusivamente al periodo de explotación de las minas, sino que la incorrecta gestión de la clausura de una mina puede suponer consecuencias en el medio ambiente incluso peores que cuando estaba en explotación. (Johnson, D. B. & Hallberg 2005; Lee, M., Paik, I. S., Kim, I., Kang, H. & Lee 2007)



A continuación, se muestra un resumen de los tipos afecciones que esta actividad puede llegar a provocar en el medio ambiente clasificados según el momento de la explotación en los que pueden aparecer.

Para un mayor detalle sobre los distintos tipos de afecciones de la actividad minera a los medios receptores de la contaminación, se pueden consultar los trabajos de (Almau 2012), (T. Herrero 2014) o (Johnson, D. B. & Hallberg 2005), entre otros.

### **2.2.2. Problemas ambientales específicos de las aguas de mina**

Aunque en el apartado anterior hayan quedado reflejadas algunas de las afecciones que puede ocasionar el vertido incontrolado de las aguas de mina, en este apartado se pretende detallar las consecuencias de esos vertidos e indirectamente mostrar las ventajas ambientales que supone el reaprovechamiento de este recurso.

Numerosos autores han estudiados los efectos que tienen los drenajes de agua de mina en el medio ambiente (Ledin, M. & Pedersen 1996; Almau 2012; Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop 2004; Johnson, D. B. & Hallberg 2005; Akcil, A. & Koldas 2006; Cravotta 2010; Kalin, M., Fyson, A. & Wheeler 2006; Kelly 1988; Elliot, P., Ragusa, S. & Catecheside 1998; Costa, M. C., Martins, M., Jesus, C. & Duarte 2008; Lee, M., Paik, I. S., Kim, I., Kang, H. & Lee 2007; Mackie, A. L. & Walsh 2012; A. Herrero 2012), aunque éstos varían dependiendo de las características del agua. Los más perjudiciales son los asociados a aguas ácidas ya que tienen pocos nutrientes (Ledin, M. & Pedersen 1996) y generan incrustaciones en los cauces naturales, generalmente hidróxidos metálicos y ocre (Mackie, A. L. & Walsh 2012), que pueden eliminar la fauna bentónica que sirve de sustento para los peces (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017). Además, suelen ir asociadas a un alto contenido de metales pesados, los cuales resultan tóxicos para los seres vivos del medio ambiente donde se introducen (Almau 2012; Johnson, D. B. & Hallberg 2005). Además, los sólidos en suspensión pueden crear turbidez en el ecosistema y reducir la penetración de la luz, fundamental para los organismos que vivan en el cauce (CCME 1987; Brown, M., Barley, B. & Wood 2002; Bell, F.G. & Donnelly 2006; Mackie, A. L. & Walsh 2012)

Al verterse sobre cauces naturales o directamente sobre el suelo se produce una acidificación del mismo eliminando las bases y provocando un desequilibrio nutricional para los seres vivos vegetales (Almau 2012).

Los drenajes de agua alcalinos no tienen efectos tan dañinos como los drenajes ácidos (Akcil, A. & Koldas 2006) debido a que no tienen asociada tanta concentración de metales pesados.



El control de los drenajes de agua de mina es fundamental para evitar la posible contaminación que puedan generar. Mientras que la mina está en funcionamiento estos drenajes se controlan y se tratan evitando los efectos adversos anteriormente destacados. Sin embargo, cuando la actividad productiva de la mina llega a su fin, el control de estos drenajes cesa y es cuando existe un mayor riesgo de encontrar los efectos ambientales derivados de estas aguas (Lee, M., Paik, I. S., Kim, I., Kang, H. & Lee 2007). La parada de las bombas de desagüe en el frente de los trabajos de la mina provoca la inundación de la misma y la descarga de drenajes ácidos (Johnson, D. B. & Hallberg 2005).

Para minimizar los riesgos de contaminación, las aguas deben ser recogidas y tratadas hasta que cumplan los parámetros que aseguren que no se va a afectar negativamente a ecosistemas cercanos (Akcil, A. & Koldas 2006). En general, estos tratamientos se dan en las proximidades de las descargas de agua de mina y consisten en la neutralización de la acidez del agua y la remoción de los metales pesados disueltos en la misma (Cravotta 2010). Normalmente, el potencial contaminante de los drenajes de mina es mucho mayor tras la inundación de la instalación y va reduciéndose con el paso del tiempo (Clarke 1995; Johnson, D. B. & Hallberg 2005), por ello, es necesaria la vigilancia tras el cese de los trabajos en las minas para evitar que las primeras aguas se viertan en los cauces naturales incontroladamente.

En las minas del Valle Laciana la vigilancia de post-clausura de las mismas no se ha realizado convenientemente, resultando en afecciones importantes a la fauna y flora del entorno de la comarca (Naves, J., Wiegand, T., Revilla, E., & Delibes 2003; De Luis, E., Purroy, F., Ansola, G., Falagán, J., Arroyo, P., & Álvarez 2008; A. Herrero 2012). A modo de ejemplo, en la figura nº5 se pueden observar las costras de hidróxidos metálicos dejadas por el agua que sale de la bocamina del Grupo Carrasconte.

El aprovechamiento energético de estas aguas permitirá el control y el tratamiento de las mismas transformando un riesgo medioambiental en un recurso beneficioso para la comunidad donde se hallen las minas.



Figura nº5. Incrustaciones metálicas de las aguas de la mina de Carrasconte.

### 2.2.3. Legislación

Dentro de la legislación minera se trata con especial atención los efectos que esta actividad tiene sobre el medio ambiente y sobre el entorno colindante, tanto en fase de explotación como en fase de abandono. Actualmente el texto legal de referencia que regula este aspecto es el siguiente:

- Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

El objeto de este Real Decreto es el establecimiento de medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos adversos que puedan producir la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales sobre la salud humana y el medio ambiente.

### 2.2.4. Ejemplos

En este apartado se han recopilado algunos ejemplos encontrados en la bibliografía existente sobre los problemas ambientales que han provocado las aguas de mina una vez se ha acabado la explotación de las instalaciones mineras correspondientes.



Los ejemplos recogidos por Graham, M.C. & Farmer (2007), recopilados y expuestos, a su vez, por Mendiguchía (2005), dan una idea del grado de contaminación que se puede producir por este tipo de industria:

- En el suroeste de Inglaterra existen numerosas explotaciones mineras abandonadas. El proceso de abandono e inundación ha provocado importantes vertidos de aguas de mina en diversas regiones, entre los que destaca el de la mina de estaño de Whale Jane, en Cornwall, en 1992. Tras la inundación de la mina se produjo un vertido ácido con una gran concentración de cobre, plomo, cadmio, estaño y arsénico en los ríos Fal y Carnon. Se liberaron alrededor de 50.000 m<sup>3</sup> de agua contaminada, aunque los efectos negativos de la misma fueron amortiguados en gran medida gracias a la buena estratificación del estuario. Esto evitó la contaminación de la biota situada en el lecho del río y favoreció la eliminación de los contaminantes por dilución y dispersión (Younger, P.L., Banwart, S.A. & Hedin 2002).
- Uno de los mayores incidentes registrados en Oceanía se produjo en la mina de Mt Lyell en Queenstown (Tasmania). Esta mina de cobre fue clausurada en 1994 y tras el cese de la actividad se produjo el vertido de más de 100 millones de toneladas de escoria de fundición, así como grandes cantidades de drenaje ácido. Los ríos afectados por este vertido fueron los ríos King y Queen en los que se redujo fuertemente el pH de sus aguas y se liberaron elevados contenidos de materia particulada y metales, en su gran mayoría cobre (Featherstone, A. M. & O'Grady 1997; Mendiguchía 2005).
- También se han encontrado referencias a incidentes ocasionados en España, donde las actividades mineras han provocado recurrentemente vertidos de metales al medio acuático. Un ejemplo fue la mina de Troya (Guipúzcoa) que, tras su cierre, produjo una descarga de agua contaminada al recuperarse el nivel piezométrico de las aguas dentro de la misma. Esto produjo una elevación en la concentración de sulfatos y metales disueltos que ocasionó la desaparición de gran parte de animales acuáticos de la zona (Iribar, V., Izco, F., Tames, P., Antigüedad, I. & da Silva 2000; Mendiguchía 2005).
- Otro ejemplo se puede encontrar en las minas de las cuencas de los ríos Tinto y Odiel explotadas desde los tiempos de los romanos. La explotación recurrente de estas minas hace que haya zonas de los ríos que tengan un pH inferior a 3 y elevados contenidos de metales pesados (Schell, C., Macklin, M.G. & Hudson-Edwards 1996; Mendiguchía 2005).



- En cuanto a explotaciones mineras romanas, no se pueden dejar de mencionar las minas de oro de Las Médulas situadas en la comarca de El Bierzo, cerca de la zona objeto de este trabajo. Se trata de un entorno paisajístico formado por la mayor mina de oro romana a cielo abierto conocida, la cual estuvo en explotación hasta el siglo III D.C. (Domergue 1972). El impacto ambiental durante su explotación y tras su abandono fue muy notable, sin embargo, la afección a las aguas de la zona ha ido disminuyendo con el tiempo siendo actualmente poco significativa.

### **2.3. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE MINA PARA USOS CONVENCIONALES**

El aprovechamiento de las aguas de mina permite poner en valor un recurso que actualmente no solo no es útil, sino que es dañino debido a sus repercusiones medioambientales. Existen diversas formas de reutilización dependiendo de las características físico químicas de las aguas de mina. Se van a considerar usos convencionales todos aquellos que no son usos energéticos, como por ejemplo los considerados por Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh (2010):

- Aprovechamiento de las aguas de mina para uso doméstico.
- Aprovechamiento de las aguas de mina para uso industrial.
- Aprovechamiento de las aguas de mina para uso agrario.
- Aprovechamiento de las aguas de mina para uso en ganadería.

En ciertas ocasiones se ha planteado utilizar el agua proveniente de drenajes de mina para mantener el cauce ecológico de ríos poco caudalosos en verano (Jardón 2010).

#### **2.3.2. Uso doméstico**

En casos en los que el abastecimiento de poblaciones sea deficiente y el complejo minero se encuentre en la proximidad de las mismas, el aprovechamiento de estas aguas para el consumo humano puede ser una alternativa viable. Los parámetros del agua deben cumplir estrictamente con los estándares previstos por las distintas legislaciones; en el caso de España, el documento de referencia es el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

El manganeso es un parámetro importante a tener en cuenta cuando se plantean redes de agua de consumo humano ya que provoca un sabor metálico en el agua, puede llegar a manchar la colada y provoca atascos de la red de distribución en caso de que precipite (Hallberg, K. B. & Johnson 2005).





La dureza también se debe controlar debido a que altos valores de este parámetro pueden provocar precipitaciones de carbonato cálcico y la consiguiente incrustación en la red de distribución. También se ha demostrado que el consumo continuado de aguas duras puede aumentar la incidencia de ciertos tipos de cáncer y desórdenes cardiovasculares (Agrawal, V. & Jagetia 1997; Durvey, V.S., Sharma, L.L., Saini, V.P. & Sharma 1991; Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

Altos contenidos de sulfatos también afectan a las condiciones del agua, una concentración de entre 200 y 400 mg/l provoca un sabor amargo, mientras que una concentración superior a 1.000 mg/l pueden ocasionar problemas intestinales en las personas que lo consuman. Por otro lado, provoca olores desagradables y corroe las tuberías de distribución (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

La viabilidad de este uso depende en gran medida de los parámetros del agua, ya que cuanto peor calidad tenga el agua mayor intensidad de tratamiento requerirá. El estudio de Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh (2010) deja patente que la gran mayoría de las aguas estudiadas en la mina de Raniganj, en la India, necesitarían de tratamiento para ser aptas para consumo humano. Sin embargo, un estudio sobre el aprovechamiento de las minas de HUNOSA dejó de manifiesto que varios de los drenajes superficiales de sus minas de montaña podrían llegar a utilizarse para consumo humano sin un tratamiento específico más intensivo que el habitual (HIPSITEC 2007).

### **2.3.3. Uso industrial**

Los requerimientos para usos industriales del agua varían mucho dependiendo del tipo de industria y los procesos en los que serían utilizados las aguas. En general, las altas concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (TDS), Dureza total (TH) o sulfatos hacen que las aguas de mina no sean recomendables para la industria textil, papelera o siderúrgica (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010). Sin embargo, con un correcto tratamiento podrían llegar a utilizarse. Por su parte la industria alimenticia suele tener los mismos requerimientos que los que exige el agua para consumo humano, por lo tanto, en muchos casos, serían necesarios tratamientos previos (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

### **2.3.4. Uso agrario**

El uso agrario más desarrollado es el de utilizar el agua de las minas para riego. Este agua debe satisfacer las necesidades del suelo, plantas y cultivos que permitan una producción



estándar. El alto contenido de sales afecta negativamente al crecimiento de las plantas, a la estructura del suelo, a la permeabilidad y a la aireación (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

La salinidad del agua de riego puede clasificarse de la siguiente manera (Richards 1954):

- Baja (EC = 250  $\mu$ S/cm)
- Media (EC = 250–750  $\mu$ S/cm)
- Alta (EC = 250–750  $\mu$ S/cm)
- Muy alta (EC = 2,250–5,000  $\mu$ S/cm)

Los índices generalmente utilizados para determinar si un agua es adecuada para su uso como agua de riego son el ratio de absorción de sodio (SAR), porcentaje de sodio (Na%), carbonato sódico residual (RSC) y el índice de permeabilidad (PI) (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

### **Ratio de Absorción de Sodio (SAR)**

Altas concentraciones de sodio en el suelo limitan la capacidad de las plantas de absorber el agua. Aguas con baja salinidad y poca concentración de sodio son adecuadas como agua de riego en prácticamente cualquier suelo (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

Las aguas de riego se pueden clasificar en cuatro categorías dependiendo de su SAR: bajo (0-10), medio (10-18), alto (18-26) y muy alto (>26), calculando el SAR como sigue:

$$SAR = Na / \sqrt{Ca + Mg} / 2$$

Siendo Na, Ca y Mg las concentraciones de Sodio, Calcio y Magnesio en meq/l respectivamente (Richards 1954).

### **Porcentaje de sodio (%Na)**

El porcentaje de sodio es otro índice muy utilizado para dilucidar si un agua es apta para ser utilizada como agua de riego o no (Wilcox 1955).

Este índice se calcula como sigue:

$$\%Na = Na + K / (Ca + Mg + Na + K) \times 100$$

Con este índice y la conductividad del agua se puede obtener una estimación de las bondades del agua estudiada para ser utilizada como agua de riego, a través del diagrama de Wilcox (Wilcox 1955), en los que aparecen diferentes zonas entre las que se encuentran:

- No apta



- Dudosa
- Aceptable
- Buena
- Excelente

En la figura nº6 se puede ver un ejemplo de la utilización de este diagrama en el estudio de (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010) para las aguas de mina de la mina de Raniganj en India.

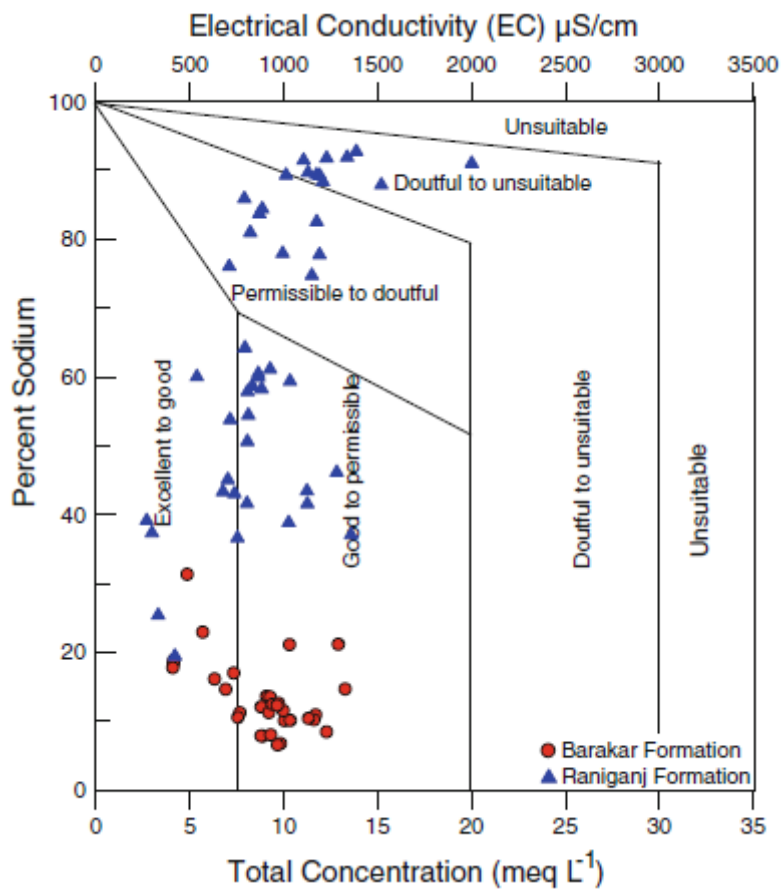


Figura nº6. Diagrama de Wilcox con campos de aptitud para aguas de riego (ejemplo con datos de Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh (2010)).

### **Carbonato sódico residual (RSC)**

Otro factor que afecta a la calidad del agua para su uso en riegos es la cantidad de iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) en comparación con la cantidad de iones calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e iones magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). El exceso de los primeros hace que los iones calcio y los iones magnesio precipiten en forma de carbonato cálcico o carbonato magnésico (Karanth 1989), lo que aumenta el ratio de la absorción de sodio por parte del terreno (Eaton 1950).



Esto se analiza con el índice de Carbonato sódico residual (RSC):

$$\text{RSC} = (\text{HCO}_3^-) + (\text{CO}_3^{2-}) - (\text{Ca}^{2+}) - (\text{Mg}^{2+})$$

Con todas las concentraciones en meq/l.

Valores de RSC superiores a 5 meq/l son considerados dañinos para el crecimiento de las plantas, mientras que el valor de 2,5 meq/l es el límite para considerar apta un agua para su uso en regadíos.

### **Índice de permeabilidad (PI)**

Como se ha dicho anteriormente, la permeabilidad del suelo es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar una plantación y es afectada por aguas ricas en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

El índice de permeabilidad relaciona la concentración de estos cuatro componentes para evaluar la capacidad de un agua para ser utilizada como riego (Doneen 1964).

$$\text{PI} = \frac{\text{Na} + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na}} \times 100$$

Con todas las concentraciones en meq/l.

(Doneen 1964) clasificó las aguas de riego en tres clases dependiendo de su PI y la Dureza total (TH): Clase I, Clase II y Clase III. Las dos primeras son aceptables para su uso en regadíos, mientras que la última no lo es. En la figura nº7 se puede ver un ejemplo de la clasificación del agua en función del índice de permeabilidad llevado a cabo por (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010) en el estudio de las aguas de mina de la mina de Raniganj en India:

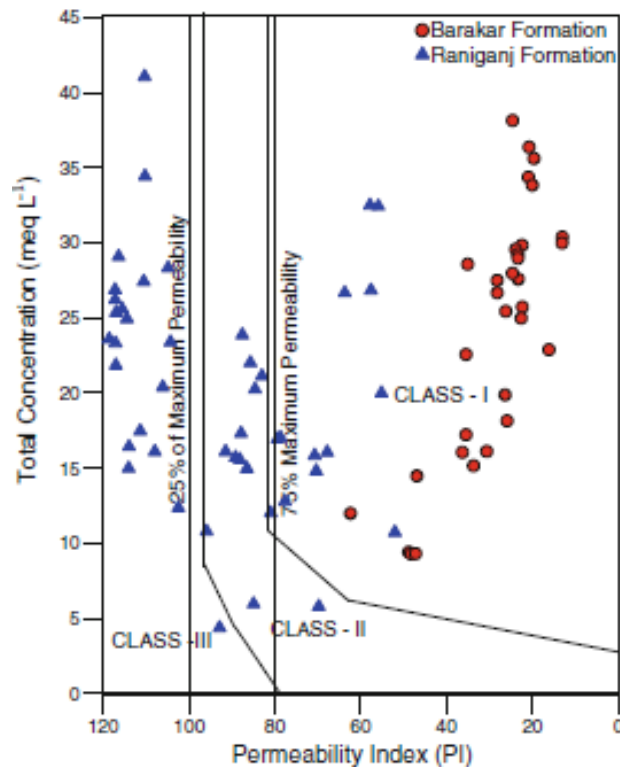


Figura nº7. Diagrama de Doneen con campos para el índice de permeabilidad (PI) (datos de Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

### Ratio de Magnesio

Otro parámetro a tener en cuenta es el ratio de Magnesio. En este ratio se relaciona la concentración de iones  $Mg^{2+}$  con la suma de los iones  $Mg^{2+} + Ca^{2+}$  de la siguiente manera:

$$RM = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Ca^{2+}) \times 100$$

Si este ratio es mayor del 50%, entonces el agua se considera como no apta para riego (Szabolcs, I. & Darab 1964).

### 2.3.5. Uso en ganadería

En general, se puede decir que los usos de agua para consumo por parte del ganado tienen los mismos requerimientos que para consumo humano. Sin embargo, tanto la salinidad como el TDS pueden ser algo mayores. (Ayers, R.S. & Wascot 1985; Shuval, H.I., Adin, A., Fialal, B., Raawitz, E. & Yekuterl 1986; Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010) indican que si la salinidad del agua está en el entorno de 1500 mg/l entonces dicho agua podría ser admisible para consumo de ganado. La mayoría de las aguas de mina que rebosan tras inundar las labores mineras y habiendo evitado los primeros drenajes tóxicos, son aceptables



para este uso tras un pretratamiento con filtros (Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh 2010).

## **2.4. APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS DE MINA COMO RECURSO ENERGÉTICO**

### **2.4.2. Aprovechamiento de las aguas de mina como recurso geotérmico**

Tras ser abandonadas, las minas normalmente se anegan de agua debido a la recuperación del nivel freático natural del terreno, fenómeno conocido como “rebote del agua de mina”. La estabilidad térmica de las aguas que ocupan estas minas puede ser utilizada como recurso geotérmico mediante bombas de calor (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017). La circulación del agua dentro de las minas se regula por el fenómeno de la convección, por lo tanto, las aguas que son descargadas por bocaminas o directamente por los pozos mineros tienen una temperatura considerablemente mayor que el agua de los cauces naturales en superficie (Jessop, A. M., Macdonald, J. K. & Spence 1995).

El cierre de las minas en todo el mundo, y especialmente en Europa ha hecho que se busquen métodos alternativos de aprovechamiento de los recursos mineros. Hasta finales de la primera década del siglo XXI habían sido pocos los proyectos llevados a cabo para el aprovechamiento geotérmico de las aguas de mina (Raymond, J. & Therrien 2008). Sin embargo, a partir del estudio de Watzlaf, G. & Ackman (2006) en el que se demostró que la inversión en este campo podía ser rentable, se han desarrollado numerosos estudios en este sentido (Wieber and Pohl 2008; Wolkersdorfer 2008; Uhlík, J. & Baier 2012; Jardón 2010; Ghoreishi, S.A., Ghomshei, M. M., Hassani, F. P. & Abbasy 2012; Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011; Hamm & Bazargan 2010; Jardón, S., Ordóñez, A., Álvarez, R., Cienfuegos, P. & Loredó 2013; Kranz, K. & Dillenardt 2010; Peralta, E. & Falcone 2013; Raymond, J. & Therrien 2008; Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014) entre otros. En el año 2015, existían 18 proyectos de aprovechamiento de aguas de mina abandonadas como recurso geotérmico desarrollados en todo el mundo (Andrés, C., Ordóñez, A. & Álvarez 2015).

Las minas de carbón son uno de los mejores tipos de mina para el aprovechamiento de sus aguas, en gran parte por la poca concentración de metales pesados que tiene, en comparación con otros tipos de mina como las de estaño o las de oro (Watzlaf, G. & Ackman 2006). La forma más económica y eficiente de aprovechar geotérmicamente las aguas de mina es utilizar el calor de las aguas que están siendo ya bombeadas, no dejando que las minas se inunden (Renz, A. Rühaak, W., Schätzl, P. & Diersch 2009). No obstante, en muchas



ocasiones el abandono de los trabajos no se hace responsablemente y se permite que las minas queden anegadas.

La temperatura del agua de las minas abandonadas en Europa suele estar entorno a los 14°C, lo que permite su utilización tanto para calefacción como para refrigeración a través de una bomba de calor agua-agua, lo cuál puede ser considerablemente más barato que operar un sistema de calefacción y refrigeración convencional (Milenic, D., Vasiljevic, P. & Vranjes 2010; Jardón, S., Ordóñez, A., Álvarez, R., Cienfuegos, P. & Loredó 2013).

En invierno se puede extraer el calor de estas aguas para su uso como agua caliente sanitaria mientras que en verano el proceso puede ser revertido pudiendo refrigerar instalaciones o edificios. Aunque la tecnología no está totalmente extendida, el uso de aguas de mina abandonadas como geotermia de baja entalpía ya se está utilizando en Canadá, Alemania, Estados Unidos, Reino Unido o España.

La tecnología ha sido probada en varios proyectos tanto en minas en explotación como en minas abandonadas (Andrés, C., Ordóñez, A. & Álvarez 2015).

En el caso de las minas en explotación, la reutilización de las aguas extraídas de la misma podría suponer un ingreso adicional para los promotores de la mina haciendo más atractivos los proyectos mineros para posibles inversores (Watzlaf, G. & Ackman 2006). En el caso de las minas abandonadas el aprovechamiento de estas aguas ayudaría a continuar con la sostenibilidad del conjunto del proyecto minero generando puestos de trabajo locales e incentivos para continuar con un tejido industrial y productivo en aquellas zonas donde la actividad minera haya cesado. Supondría además de un proyecto empresarial, un proyecto social que puede dar solución a la despoblación de las comunidades mineras una vez acaba la actividad principal (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a).

Se muestra, en lo que sigue, una relación de proyectos donde se están aprovechando las aguas de mina como recurso geotérmico.

#### **2.4.2.1. Proyectos ejecutados**

##### **Heerlen, Holanda**

Se han llevado a cabo numerosas iniciativas comerciales y de investigación en Europa en la última década. Una de las más exitosas ha sido el “Mine water project” en el municipio de Heerlen cuyas minas de carbón cerraron hace más de 30 años. Los pozos involucrados son los de Oranje Nassau 1 (400 metros) y Oranje Nassau 3 (800 metros) (Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014).



En octubre de 2008 se puso en marcha un sistema de aprovechamiento de geotermia de baja entalpía bajo el programa europeo Interreg III BNWE y el EC-REMINING-LOWEX (Ferket, H. L. W., Laenen, B. J. M. & Van Tongeren 2011). Se ejecutó un pozo de 800 metros hasta encontrar el agua caliente de la mina, la cual sería posteriormente bombeada y conducida hacia un sistema que utiliza bomba de calor agua-agua para aumentar la temperatura del agua. Se ejecutó a su vez un pozo de regreso, por el cual, se devuelve el agua a la mina de donde se había extraído, tras su paso por un intercambiador de calor.

En 2013 se llevó a cabo una implementación del sistema para pasar de una planta piloto (Minewater1.0.) a un sistema de calefacción y refrigeración sostenible, pensado para formar parte esencial del plan energético de Heerlen (Minewater2.0.) (Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014).

La iniciativa contempla el suministro de agua para calefacción y refrigeración a un total de 500.000 m<sup>2</sup>, con una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> del 65%.

Las mallas entre edificios y comunidades permitirán una transferencia de energía entre las distintas comunidades según la demanda. El sistema de mallas que se pretende implantar en Heerlen puede aplicarse, a su vez, a otros modos de transferencia de calor y frío, como, por ejemplo, se puede utilizar el calor residual de invernaderos cerrados.

El interés de la corporación que está desarrollando Minewater 2.0 es una prueba de que el sistema de aprovechamiento de geotermia de baja entalpía de las aguas de mina puede ser comercialmente viable.

La compañía que desarrolla los trabajos de la red de calor de Herleen (Mijnwater B.V.) había conectado 270 viviendas a la red general, junto con un cuantioso número de oficinas, un colegio, un centro deportivo y dos supermercados en 2018 (Mijnwater 2018). En la figura nº8 se muestra un esquema funcional del complejo geotérmico de Herleen donde se pueden ver los dos pozos de extracción, los dos pozos de retorno y los principales clientes del sistema.



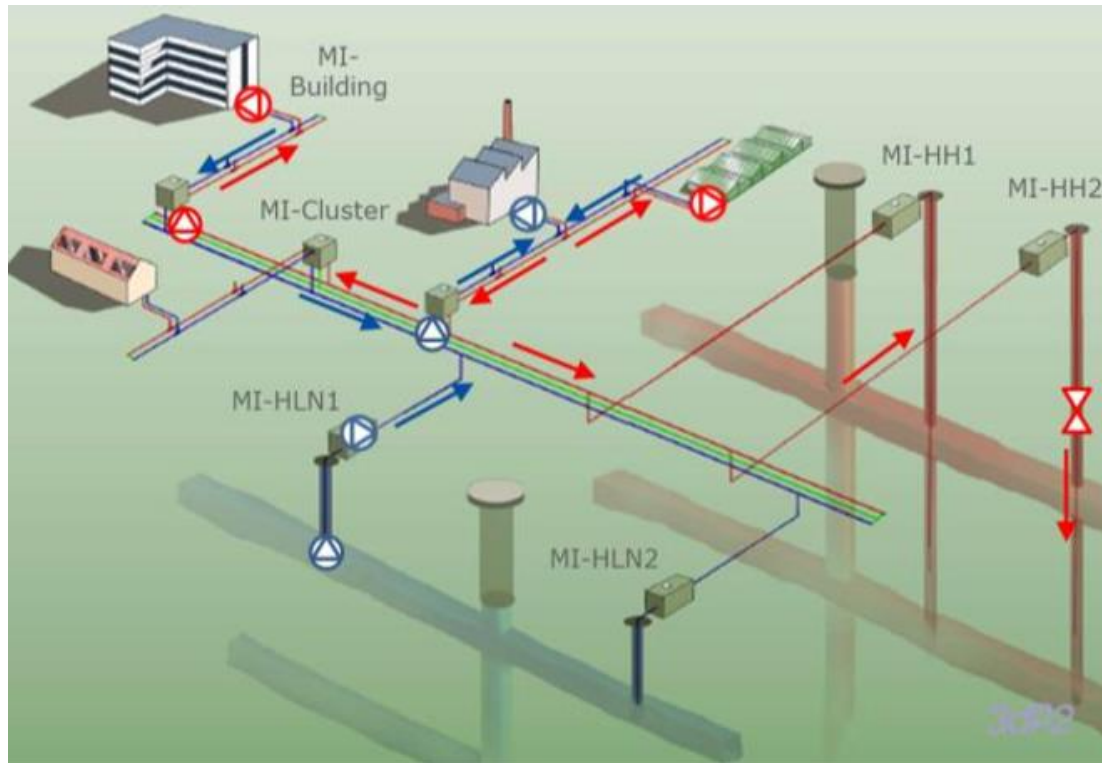


Figura nº8. Esquema funcional del proyecto de Heerlen (Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin 2014).

### Springhill, Nueva Escocia, Canadá

Ropak Can Am Ltd. Lleva aprovechando desde el año 1995 el agua de la mina abandonada de Springhill para calentar y enfriar 16.700 m<sup>2</sup> de edificios con bombas de calor. El ahorro económico del proyecto llega a la suma de 45.000\$ anuales, o su equivalente en kWh, 600.000 kWh, si se compara con sistemas convencionales (Jessop, A. M., Macdonald, J. K. & Spence 1995).

La extracción del agua se hace a 140 metros de profundidad, donde tiene una temperatura de 18°C, extrayendo un caudal de 4 l/s (Watzlaf, G. & Ackman 2006). El salto térmico que tiene esta agua en las bombas de calor es de 5°C y una vez enfriada se vuelve a inyectar en la mina en un pozo a 30 metros de profundidad. En verano se revierte el sistema para refrigerar las instalaciones (Jessop, A. M., Macdonald, J. K. & Spence 1995).

### Park Hills, Missouri, Estados Unidos

En Park Hills, Missouri, existe un edificio municipal que usa el agua de minas de plomo abandonadas como sistema de calefacción y refrigeración. La superficie total del edificio en cuestión es de 750 m<sup>2</sup> distribuidos en dos plantas. El pozo de suministro tiene 120 metros de



profundidad y bombea un caudal de agua de mina de 4,67 l/s, a 14°C, la cual es devuelta posteriormente a la mina mediante un pozo. El sistema de intercambio de calor consiste en 9 bombas de calor con una capacidad total de 113kW. El sistema de intercambio de calor tuvo un coste total mayor que un sistema convencional compuesto por aire acondicionado y una caldera de gas natural (132.400\$ comparado con 110.200\$). Sin embargo, tras realizar el seguimiento de los costes de operación, se determinó que el sistema había ahorrado 4.800\$ en 1996 si se compara con un sistema convencional (aproximadamente 30% de ahorro). El periodo de amortización de la inversión fue de 4,6 años usando los costes energéticos del año 1996 (Watzlaf, G. & Ackman 2006).

### **New Baltic nº2, Michigan, Estados Unidos**

El Keweenaw Research Center (KRC) inició en 2009 un proyecto de aprovechamiento geotérmico del agua de la mina de New Baltic nº2. De esta manera se proporcionaría calefacción y refrigeración a un total de 1022 m<sup>2</sup> correspondientes al edificio de oficinas centrales de KRC cerca del aeropuerto del condado de Houghton. El sistema geotérmico contó con 14 bombas de calor con una potencia de 435.000 BTU/h, o lo que es lo mismo, 127,5 kW (Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J. & Green 2018).

La aspiración de la bomba se encuentra a 92 metros de profundidad e impulsa un caudal de 90 gpm (24,57 m<sup>3</sup>/h) hacia un intercambiador de calor de placas, en cuyo secundario se encuentra un circuito de impulsión de 160 gpm (43,68 m<sup>3</sup>/h) que reparte el agua entre las distintas bombas de calor. El agua se extrae de la mina a 14,4°C y se devuelve a 11,4°C (Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J. & Green 2018).

En 2014 la instalación se amplió acondicionando unos 372 m<sup>2</sup> adicionales. Para ello, se contó con cuatro bombas de calor más con una capacidad de 149.000 BTU/h (43,64 kW). El sistema costó aproximadamente 100.000\$ mientras se realizaba la construcción del edificio, siendo el periodo de retorno de la inversión de entre 3 y 5 años y los ahorros energéticos del 30% si se compara el sistema con un sistema convencional de gas natural. En 2018 se estaba estudiando la posibilidad de volver a ampliar el sistema a otro edificio existente (Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J. & Green 2018).

### **Shettleston, Escocia, Reino Unido**

La empresa John Gilbert Architects rehabilitó dieciséis casas en Shettleston instalando para su calefacción un sistema de intercambio de calor que utilizaba agua de una mina de carbón abandonada. Del pozo de suministro se extraía agua a 12°C desde una galería a 100 metros de profundidad. Dos bombas de calor utilizaban el agua de la mina para calentar agua a 55°C,



la cual se almacenaba en un depósito térmico antes de ser bombeada hasta las casas. El agua de mina era devuelta a la galería a través de un pozo de retorno, tras su paso por el intercambiador de calor (Watzlaf, G. & Ackman 2006).

Este sistema es uno de los más antiguos de Gran Bretaña poniéndose en marcha en 1999 (Banks, D., Pumar, A. F. & Watson 2009). La evaluación del sistema en 2017 no encontró grandes dificultades en la operación del mismo destacando una ligera incrustación en el intercambiador de calor del evaporador. Este problema viene asociado a la naturaleza del agua, con bastante concentración de bicarbonato cálcico y bajo contenido de iones ferrosos. También destaca cierta turbidez en el agua de mina en episodios no regulares, normalmente coincidiendo con lluvias copiosas. Se sospecha que partículas de hidróxido de hierro entran en el sistema a través del agua de mina debido a estos episodios lluviosos, lo que provoca el tupidio de filtros, haciendo necesaria su limpieza. Además, el pozo ha ido perdiendo su capacidad hidráulica por lo tanto hay ocasiones en las que el agua más que ser reinyectada en la mina, discurre libremente por la superficie (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).

### **Pozos Caphouse/Hope, Yorkshire, Reino Unido**

El complejo minero de Wakefield engloba diversos pozos entre los que se encuentran los pozos “Hope” y “Caphouse” los cuales están conectados entre sí (INWATCO 2005). Los trabajos mineros en Wakefield cesaron en el año 1985, pero se encuentra actualmente abierto tras la implantación del Museo Nacional de la Minería del Carbón en sus terrenos. El pozo “Hope” es bombeado diariamente para evitar que se inunden las instalaciones del Museo Nacional y que se libere agua de mina descontroladamente a los cauces naturales.

El agua bombeada se aspira a 170 metros de profundidad y se lleva hasta un tratamiento pasivo consistente en una cascada de aireación, decantador y un humedal, antes de ser vertida controladamente (Faraldo 2007).

Se ha instalado una planta piloto para el aprovechamiento geotérmico del agua de mina, la cual se bombea a 14°C y se hace pasar por un intercambiador de calor de tubo y carcasa antes de conducirse al pozo de aireación del tratamiento antes mencionado. En el secundario del intercambiador se encuentra el circuito del evaporador de una bomba de calor Vaillant Geotherm VWS 101/2 con una potencia nominal de 10,5 kW. Esta bomba de calor proporciona agua a 50-52°C que se hace pasar por los consumidores de agua caliente correspondientes y vuelve a 45-46°C (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).



La principal desventaja de este sistema abierto es que sólo se puede proporcionar agua caliente cuando están funcionando las bombas de pozo, es decir, a primera hora de la mañana y a última hora de la tarde.

(Athresh, A. P., Al-Habaibeh & Parker 2016) recogieron los problemas encontrados en el mantenimiento de la instalación hasta la fecha no encontrándose problemas graves de incrustaciones. La sedimentación quedaba en los filtros, los cuáles han tenido que ser limpiados regularmente, sin embargo, no ha afectado al intercambiador de calor. El COP de la instalación ha variado entre 3,5 y 4 en el tiempo de monitorización, tomando agua a una temperatura media de 14,5°C y habiendo un salto térmico en el intercambiador de calor de 5-6°C. Estos niveles de COP han sido calculados sin tener en cuenta el consumo eléctrico del bombeo debido a que ese consumo iba a existir igualmente debido a la necesidad del bombeo del agua del pozo "Hope".

Alternativamente al sistema abierto antes mencionado, se ha implementado un sistema cerrado a través de un intercambiador de calor sumergido en el pozo de aireación. El agua de este pozo llega a temperaturas cercanas a los 16°C al comienzo de la tarde. Sin embargo, al comenzar el bombeo del pozo "Hope" la temperatura desciende hasta los 14°C. La capacidad de intercambio térmico del intercambiador sumergido es de 8 kW y consta de 4 bloques paralelos de 3 metros x 0,50 metros fabricados en AISI 304 con una superficie de intercambio de 11,8 m<sup>2</sup> (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).

### **Markham N°3, Derbyshire, Reino Unido**

El complejo minero de Markham está situado al norte de Bolsover, Derbyshire y engloba cuatro pozos, los cuales se explotaron de 1904 hasta 1993 (Sheppard 2005). En 2012 se desarrolló una planta piloto para aprovechamiento geotérmico del agua de mina del pozo Markham N°3 introduciendo una bomba sumergible 6" Franklin VS14/20 con un motor eléctrico de 11 kW a 235 metros de profundidad (Athresh, A. P., Al-Habaibeh & Parker 2016).

Las bombas hacían pasar agua de mina a 14-15°C por un intercambiador de calor de tubo y carcasa, cuyo secundario se conectaba con unas bombas de calor Danfoss DHP-R 20 kW. El agua se devolvía a la mina a 12°C por el mismo pozo mediante un difusor que se encontraba a 250 metros de profundidad. Las bombas de calor elevan la temperatura del agua hasta 52-55°C y se impulsa hasta las oficinas de Alkane volviendo a las enfriadoras a una temperatura de entre 45-46°C.

La eficiencia del sistema fue evaluada en abril de 2014 por (Athresh, A. P., Al-Habaibeh & Parker 2016) estimando un COP de aproximadamente 2,7. Sin embargo, en enero de 2015 el



nivel del agua dentro del pozo aumentó permitiendo subir el sistema de bombeo sumergible. En 2017 se calculó de nuevo el COP de la instalación (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017) obteniendo un valor de 1,9. Este COP refleja que la eficiencia del sistema es baja a pesar de haberle dotado de un variador de frecuencia. Hasta 2017 no se habían registrado problemas de bajada de temperatura del agua de mina a pesar de estar siendo reinyectada en el mismo pozo y tampoco se han registrado problemas de atasco u obstrucciones en las tuberías o el intercambiador, no siendo así en los filtros, los cuales necesitan un mantenimiento de limpieza periódico (Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside 2017).

### **Lumphinnans, Escocia, Reino Unido**

Dieciocho casas fueron rehabilitadas en Ochilview, Lumphinnans, para mejorar su eficiencia energética y para implementar un sistema de intercambio de calor utilizando el agua de mina de una mina de carbón abandonada. El sistema es muy parecido al existente en Shettleston, mencionado anteriormente. Del pozo de suministro se extrae agua a 14,5°C desde una galería a 170 metros de profundidad. El sistema utiliza la energía térmica del agua para calentar agua a temperaturas de entre 45°C y 53°C, este agua es almacenada posteriormente en un gran depósito antes de ser enviada a las viviendas. Este tanque es necesario debido a que las bombas de calor funcionan únicamente 18 horas al día ya que se acogen a un régimen especial en el que la energía eléctrica que consumen sale más económica. Tras su paso por el intercambiador de calor, el agua de la mina, ahora a 3°C, es descargada en un sustrato permeable que se encuentra por encima de la mina abandonada. Los costes de calefacción y refrigeración fueron reducidos en un 80% (Watzlaf, G. & Ackman 2006).

### **County Durham, Reino Unido**

La Autoridad del Carbón de Gran Bretaña (ente público creado para resolver los impactos generados por la minería del carbón) ha instalado en Dawdon, UK, un sistema de recuperación de calor mediante agua de mina combinado con placas solares. Durante varios años se ha estado monitorizando el sistema reflejando unos ahorros eléctricos de 78.000 kWh y 54,7 toneladas de CO<sub>2</sub> con un periodo de retorno de la inversión de 10 años (Satterley, C. J., Chamberlain, Si. & Broughton 2017).



## Alemania

En Alemania existen diversas instalaciones que aprovechan el agua de las minas como sistema de calefacción y refrigeración. En la tabla nº3, adaptada de (Wieber, G. & Pohl 2008), se pueden ver algunos de ellos:

| Nombre de la mina | Tipo de la mina | Localización               | Año de instalación | Capacidad | Uso final                             |
|-------------------|-----------------|----------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------------|
| Heinrich mine     | Mina de Carbón  | Essen – Heisingen          | 1984               | ~350 kW   | Calefacción en residencia de ancianos |
| Zollverein mine   | Mina de Carbón  | Essen – Katernberg         | 2000               | N/A       | Calefacción en colegio                |
| Shaft 302         | N/A             | Marienberg / Sachsen       | 2007               | N/A       | Balneario                             |
| N/A               | Mina de Estaño  | Ehrenfreidersdorf, Sachsen | 1994               | N/A       | Calefacción en colegio                |
| N/A               | Mina de Estaño  | Ehrenfreidersdorf, Sachsen | 1997               | 82 kW     | Museo y visita a mina                 |

Tabla nº3. Principales instalaciones en Alemania (Wieber, G. & Pohl 2008).

La mina de Wismut Shaft 302 en Marienberg, es parte de una mina que producía uranio y que no recibió el mantenimiento adecuado antes de su clausura. El pozo tenía 144 metros de profundidad y tuvo que ser arriestrado por dos plataformas a distintos niveles. Estos trabajos de rehabilitación se llevaron a cabo en 2005, junto con un estudio geotérmico que reveló que el agua de mina era susceptible de ser aprovechada como recurso energético. La calidad del agua era alta, tenía una temperatura de 12°C y contaba con una capacidad superior a 120 m<sup>3</sup>/h. Tras este estudio se decidió instalar una central geotérmica con una capacidad térmica de 690 kW (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011).

En Freiberg, un castillo de 500 años de antigüedad tiene un sistema de calefacción y refrigeración que utiliza aguas de mina. A 60 metros de profundidad, debajo del castillo, se encuentra una galería de una mina abandonada, de 200 m. de largo, que hace de embalse de agua templada (10,2°C). Se ejecutaron dos pozos (de 190 mm. de diámetro el pozo de suministro y de 330 mm. de diámetro el de regreso) que están diseñados para suministrar un caudal de 3 l/s al sistema de intercambio de calor ininterrumpidamente con un coeficiente de rendimiento de 3,5 (Kranz, K. & Dillenardt 2010).

La antigua mina de carbón de Robert Müser en Bochum ha sido utilizada para calentar dos colegios y la estación de bomberos local a través de agua de mina tomada a 570 metros de



profundidad y con una temperatura de 20°C (Hahn, F, Bussmann, G., Jagert, F., Ignacy, R., Bracke, R. & Seidel 2018).

En Sajonia existen siete instalaciones de aprovechamiento geotérmico de agua de mina superficiales y se está desarrollando un proyecto de agua de mina profunda. Esta instalación tomará agua de mina a 625 metros de profundidad con una temperatura de 26°C cerca de la universidad de Zwickau, en la parte oeste de Sajonia (Hahn, F, Bussmann, G., Jagert, F., Ignacy, R., Bracke, R. & Seidel 2018).

### Folldal, Noruega

La mina de Folldal en Noruega estuvo en operación desde 1748 hasta 1941 produciendo cobre, zinc y azufre. Durante este tiempo se estableció una comunidad entorno a la mina que cuenta con una sala de conciertos y banquetes en la caverna subterránea de Wormshall. Desde 1998 la temperatura de la mencionada sala ha sido regulada por bombas de calor utilizando agua de la antigua mina de Folldal. Un circuito cerrado de tuberías de 600 m de longitud y 50 mm de diámetro fue instalado en un pozo de 600 m de profundidad. Este agua alimenta una bomba de calor de 4,6 kW de potencia eléctrica que entrega aire a 22°C. El coste total de la instalación fue de 12.000 £ (Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop 2004).

En la tabla nº4 se presentan la temperatura del agua, la profundidad, el tipo de mina, la capacidad térmica y el uso final de algunos de los casos mencionados hasta el momento.

| Localización | Tra agua             | Profundidad | Tipo    | Capacidad | Uso final                 |
|--------------|----------------------|-------------|---------|-----------|---------------------------|
| Park Hills   | 14°C                 | 133m        | Carbón  | 113 kW    | Calefacción               |
| Springhill   | 18°C                 | 1350m       | Carbón  | 45 kW     | Calefacción/Refrigeración |
| Shettleston  | 12°C                 | 100m        | Carbón  | 16 casas  | Calefacción               |
| Lumphinnans  | 14,5°C               | 170m        | Carbón  | 18 casas  | Calefacción               |
| Heinrich     | N/A                  | N/A         | Carbón  | 350 kW    | Calefacción               |
| Zollverein   | N/A                  | N/A         | Carbón  | N/A       | Calefacción               |
| Sachsen      | N/A                  | N/A         | Estaño  | N/A       | Calefacción               |
| Sachsen      | N/A                  | N/A         | Estaño  | 82 kW     | Calefacción               |
| Folldal      | N/A                  | 600m        | Cu-Zn-S | 18 kW     | Calefacción               |
| Heerlen      | 30-35°C o<br>16-19°C | 700m        | Carbón  | 700 kW    | Calefacción/Refrigeración |

Tabla nº4. Características de las principales instalaciones descritas (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011).



### Cuenca Central Asturiana, España

También en España se han llevado a cabo actuaciones relacionadas con el aprovechamiento energético de las aguas de mina, en concreto, las actuaciones más destacables son las llevadas a cabo por la empresa HUNOSA en la cuenca central Asturiana.

La geología de esta zona geográfica favorece la formación de pseudo-acuíferos en los huecos abiertos por la minería debido a que predominan los materiales poco porosos y poco permeables. Esto hace que el agua subterránea discurra por fracturas y se acumule en las galerías y pozos mineros formando acuíferos artificiales (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016).

El potencial energético de las aguas de mina de toda la Cuenca central asturiana se estima en unos 260 GWh/año (Jardón 2010), lo cual equivale al consumo doméstico de calefacción de cerca de 21.900 viviendas (HUNOSA 2010).

Actualmente se han realizado tres proyectos que aprovechan el potencial geotérmico de las aguas bombeadas en el Pozo Barredo:

- Hospital Vital Álvarez Buylla
- Centro de Investigación de la Universidad de Oviedo en el Campus de Barredo
- Red de Calor Urbana (Mieres – Asturias)

El pozo utilizado para llevar a cabo estos tres proyectos ha sido el pozo Barredo, cuyo agua alcanza temperaturas próximas a 25°C, permaneciendo prácticamente constante a lo largo del año.

Las aguas del pozo son de naturaleza bicarbonatado-sódica, que en ningún caso bajan de pH 7 y no provocan problemas de corrosión en tuberías. El problema principal que afecta a las aguas es su elevada dureza, que en algunos casos llega a superarlos 50° franceses (Loredo, C., Roqueñí, N. & Ordóñez 2016). Este hecho dificulta la utilización directa de las aguas de mina como fuente fría de la bomba de calor, por lo tanto, se han colocado intercambiadores de calor intermedios por los que circula el agua de mina.

En la figura nº9 se muestra un esquema de la geometría del pozo Barredo donde se refleja la temperatura del agua que impulsan cada una de sus bombas sumergibles y una sonda situada a 250 m. de profundidad.



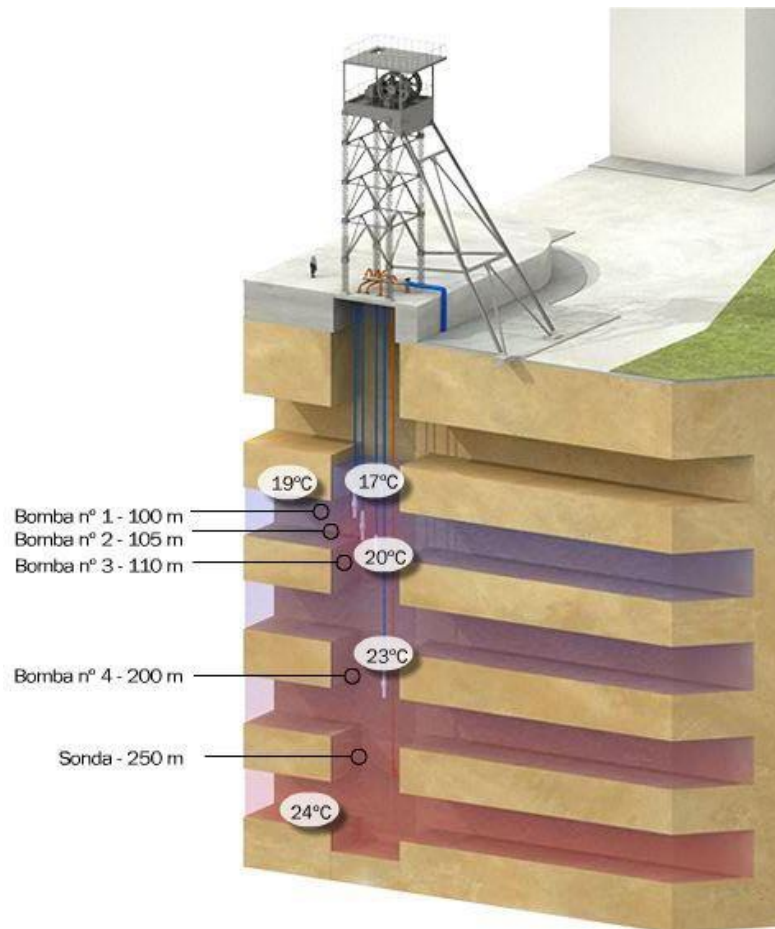


Figura nº9. Principales parámetros del Pozo Barredo y su captación geotérmica (HUNOSA 2010).

Centro de Investigación y Residencia de estudiantes, Mieres, España (HUNOSA 2011)

El Edificio de Investigación del Campus de Mieres, situado al norte de la Escuela Politécnica (EPM), es la sede de diversas organizaciones de investigación que desarrollan proyectos relacionados con la universidad de Oviedo. Por su parte, la residencia universitaria tiene una capacidad para acoger a más de 100 alumnos de la universidad de Oviedo.

El pozo Barredo se encuentra a menos de 150 metros del centro de investigación y la residencia lo que supuso una gran ventaja a la hora de evaluar la viabilidad del proyecto. La demanda térmica de los edificios es de 120 m<sup>3</sup>/h y 60m<sup>3</sup>/h, respectivamente, la cual es cubierta por la extracción del agua de mina mediante bombas sumergibles con un caudal nominal de 215 m<sup>3</sup>/h y una altura nominal de 60 metros.

Para transportar el agua de mina hasta los edificios se utiliza una conducción en zanja formada por tuberías preaisladas que tras su paso por los edificios van a verter las aguas al río Duro bajo la rotonda de la Guareña, tal y como se muestra en la figura nº10. En esta figura se muestran además los diámetros y materiales de las conducciones.



Figura nº10. Principales parámetros del sistema de conducción del Pozo Barredo (HUNOSA 2011)

El sistema de calefacción/refrigeración del Centro de Investigación incluye dos bombas de calor RTWB210 (potencia calorífica 362kW cada unidad) que producen agua caliente entre 45°C y 50°C. Simultáneamente, se produce agua a 7°C en el foco frío de las enfriadoras utilizada como refrigerante.

El agua de mina se utiliza como sistema de compensación en los desequilibrios térmicos que pueda sufrir el sistema, de esta manera, cuando la demanda de frío supera a la de calor, se disminuye la temperatura del retorno de las enfriadoras a través de un intercambiador de calor. Si, por el contrario, se produce un exceso de generación de refrigeración, el agua de mina regula el salto térmico de las bombas de calor aportando calor a través de otro intercambiador.

En la Residencia de Estudiantes no existen demandas de frío, por lo tanto, el sistema energético de su sala técnica es menos complicado que en el Centro de Investigación. El sistema de calefacción es de suelo radiante y su demanda calorífica es cubierta por una bomba de calor RTWB207 que produce agua caliente a 35°C, con un retorno de 30°C. Como se ha señalado con anterioridad, los evaporadores de los sistemas no son alimentados directamente por agua de mina, sino que existen circuitos intermedios con intercambiadores de calor por los que pasa el agua de mina. En el caso de la residencia universitaria, el



intercambiador de calor intermedio es el modelo UFP-54/50 y se utiliza fundamentalmente para evitar incrustaciones cálcicas en las bombas de calor.

Mediante la aplicación del sistema geotérmico descrito se consigue un ahorro en las emisiones de CO<sub>2</sub> del 68% (IDEA, 2011) ya que las emisiones resultantes con dicho sistema son de 113,2 t de CO<sub>2</sub> mientras que si se utilizaran tecnologías convencionales las emisiones estimadas serían de 349,5 t.

Los beneficios de la implantación del sistema geotérmico con agua de mina no sólo son medioambientales, sino que suponen un ahorro económico al usuario final, en este caso la Universidad de Oviedo. El ahorro estimado es del 20% en el caso del Centro de Investigación y del 15% en el caso de la Residencia de estudiantes.

#### Hospital Álvarez Buylla, Mieres, España (HUNOSA 2012)

Este hospital se sitúa en el sur de la ciudad de Mieres, a 2 km del pozo Barredo, y cuenta con 28.000 m<sup>2</sup> de superficie construida donde se incluyen 120 habitaciones para pacientes y todos los servicios médicos de un hospital general entre los que destacan quirófanos, salas de rehabilitación, laboratorios, etc. El hospital le da servicio a una población de 67.000 habitantes que residen, en su gran mayoría en la cuenca del Caudal, siendo los núcleos servidos más importantes Mieres, Lena y Moreda de Aller.

La potencia instalada del sistema geotérmico de aprovechamiento de agua de mina del Hospital Álvarez Buylla de Mieres asciende a 3.500 kW siendo el mayor sistema de España de este tipo.

Se pueden distinguir cinco partes en la instalación:

- Sistema de Bombeo dentro del Pozo Barredo: El sistema de aprovechamiento geotérmico del agua de mina instalado en Mieres utiliza cuatro bombas sumergibles GRUNFOSSP-215-4-AA con un caudal nominal de 215 m<sup>3</sup>/h y una altura nominal de 60 metros.
- Intercambiador de calor: Se ha dispuesto un intercambiador de calor intermedio entre el sistema de bombeo de agua de mina y las bombas de calor con el fin de evitar las incrustaciones en las mismas. Se trata de un intercambiador de calor de tubo y carcasa con una potencia de 500 kW situado en la propia nave del castillete del Pozo Barredo. En la figura nº11 se aprecia la disposición del intercambiador de agua de mina el cual tiene una disposición 3x3 con tres carcasas en serie y 3 circuitos en paralelo.



Figura nº11. Intercambiador de calor y bombas de la red del hospital Álvarez-Buylla (HUNOSA 2012)

- Sistema de impulsión: La distancia entre el Pozo Barredo y el Hospital Álvarez Buylla es de unos 2 km. El agua es transportada mediante tuberías de polietileno PE-100 Ø400 y es impulsada mediante un sistema 2+1 de bombas hidráulicas con una potencia de 37 kW cada una y un caudal unitario de 260 m<sup>3</sup>/h. La figura nº12 muestra el trazado de la conducción desde la sala de generación hasta el hospital.



Figura nº12. Recorrido de la tubería de distribución (HUNOSA 2012)

- Sistema de generación: se trata de un sistema formado por tres bombas de calor que pueden generar calor o frío dependiendo de las necesidades del complejo hospitalario.



Dos de las enfriadoras son gemelas con una potencia de 1.509 kW y un COP de 5,54, mientras que la tercera tiene una potencia de 1.298 kW y un COP de 4,87.

- Sistema de control: Por último, se destaca el sistema de control capaz de regular todo el sistema suministrando la cantidad necesaria de calor o frío según la demanda del cliente.

El seguimiento de los parámetros de este sistema por parte del personal de mantenimiento ha arrojado un ahorro de energía primaria anual del 62% si se compara con la utilización de energías convencionales, a lo que hay que sumarle un ahorro del 67% en emisiones de CO<sub>2</sub>.

### Red de calor urbana de Mieres

La construcción de esta red, cerca de su culminación a mediados de 2.020, dará servicio al instituto de educación secundaria Bernaldo de Quirós (iBQ), a la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) y a un conjunto de edificios, situados en la zona del Vasco-Mayacina, que cuentan en total con 248 viviendas (Velasco 2018).

El sistema cuenta con los siguientes elementos (HUNOSA 2019):

- Un sistema de bombas formado por dos bombas sumergibles de caudal nominal 250 m<sup>3</sup>/h y 90 kW de potencia.
- Un intercambiador de calor de carcasa y tubos de 2.090 kW de potencia situado en la nave del pozo.
- Dos bombas de calor situadas en la antigua nave de la máquina de extracción del pozo Barredo de 1 MW de potencia cada una que funcionan en serie y a contraflujo.
- Tres circuitos de distribución que unen el sistema de generación con los distintos clientes a través de tuberías de polipropileno (PPR). Los circuitos que dan servicio a la EPM y al iBQ son de alta temperatura (80-85°C) mientras que el que da servicio a las viviendas del Vasco-Mayacina es de baja temperatura (40-45°C).

Los clientes cuentan actualmente con sistemas de generación de calor propios (calderas), los cuales pasarán a formar parte de un sistema de apoyo energético una vez comience a funcionar el sistema geotérmico.

### Red de calor urbana de Langreo

A mediados de 2.019 se comenzó la redacción del proyecto de la red de calor de Langreo a través del pozo Fondón, también promovido por la empresa asturiana HUNOSA.

Esta red de calor está concebida para abastecer a dos clientes públicos como son el Centro Deportivo Juan Carlos Beiro y el centro de salud de Langreo, y a tres clientes privados como



es un edificio que contiene 45 viviendas de protección pública, el Langrehotel y la Residencia de mayores Nuestra Señora del Fresno (García-Carro, F.M. & Solís 2019).

El sistema geotérmico será similar al descrito en el caso de la red urbana de calor de Mieres ajustando los caudales a las demandas de cada uno de los clientes. Se espera que haya un total de 2.700 metros de tuberías que transporten el agua caliente desde la sala de generación, situada en las instalaciones del pozo Fondón hasta los clientes.

Se espera que el conjunto de la obra entre en funcionamiento en 2.021 resultando en un sistema geotérmico de 1290 kW de potencia instalada (Peláez 2020).

#### **2.4.2.2. Estudios teóricos e iniciativas**

En este apartado se quieren poner de manifiesto algunos estudios de aprovechamientos de aguas de mina que, o bien no han llegado a ejecutarse, o no se ha encontrado la referencia de su construcción en la bibliografía consultada.

Se recogen también en este apartado diversas iniciativas y promociones llevadas a cabo para potenciar la investigación y el desarrollo de este tipo de proyectos. Uno de los más importantes en Europa es el denominado "Bajo carbono después de la vida útil: uso sostenible de las minas de carbón inundadas como fuente de energía térmica – actividad crítica para minimizar los riesgos ambientales posteriores al cierre" (LoCAL). Esta iniciativa investiga sobre todos los aspectos del estudio geotérmico de las minas, desde el desarrollo de herramientas para la modelización de los flujos térmicos e hidráulicos dentro de las mismas, hasta la gestión económica y repercusiones legales que podría tener este tipo de proyectos (Janson, E., Gzyl, G., Głodniok, M. & Markowska 2017). Algunos de los ejemplos de desarrollo de esta iniciativa son las colaboraciones público-privadas entre organismos públicos de investigación y empresas privadas en UK (Universidad de Glasgow en asociación con Alkane Energy Ltd.) en España (Universidad de Oviedo en colaboración con Hunosa) y en Polonia (Instituto Central de la minería en asociación con Armada Desarrollos).

#### **Mina de cobre Britannia, British Columbia, Canadá**

La característica más particular de esta mina es que a través de su pozo, de 1.250 metros de profundidad, sale un caudal medio de 600 m<sup>3</sup>/h, lo que elimina la necesidad de bombear el agua del propio pozo. La temperatura del agua que sale a la superficie es de 15°C y la potencial energía que podría suministrar la mina se ha estimado en una cifra de entre 1,2 y 5 MW. Sin embargo, existen grandes dificultades relacionadas con este proyecto como, por ejemplo, la irregularidad del flujo de salida y la pobre calidad de las aguas embalsadas. La



primera de las adversidades se puede subsanar desarrollando un sistema de control que tenga en cuenta los datos históricos de caudales emanados. Se puede diseñar un sistema de depósitos que acumulen el agua extraída de la mina y que garanticen el suministro de agua caliente a un sistema de calefacción. La segunda de las adversidades radica en el bajo pH y a la gran concentración de metales pesados que tiene el agua. La calidad del agua hace imposible utilizar un circuito abierto, por lo tanto sería necesario desarrollar el proyecto con un circuito cerrado, lo cual reduce el rendimiento del sistema (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011).

### **Con mine, Yellowknife, Canadá**

Con mine, en Yellowknife, Canadá, fue objeto de un estudio en 2007 para el aprovechamiento geotérmico de sus aguas, por parte de (Ghomshei 2007). Esta mina de oro abandonada cuenta con agua a 35°C en sus niveles más profundos y puede suponer un cambio en el consumo energético de Yellowknife debido a que puede reducir la fuerte dependencia que tiene esta ciudad al respecto de los combustibles fósiles. Se ha estimado que podría proporcionar 10 MW térmicos para calentar la ciudad en caso de aprovechar completamente su potencial geotérmico (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011).

### **Minas Gaspé, Québec, Canadá**

(Raymond, J. & Therrien 2008) desarrollaron un estudio geotérmico de las aguas de las antiguas minas Gaspé, en la península del mismo nombre, cerca de la ciudad de Murdochville, Canadá. Las extremas condiciones de esta zona (1,6°C de temperatura media del aire) hacen que, aunque el agua que sale de las minas esté a una temperatura fría (6,7°C), en comparación con otros aprovechamientos (14°C de media en Europa (Milenic, D., Vasiljevic, P. & Vranjes 2010)), aún se considere como un recurso térmico potencialmente utilizable. Con una reducción de la temperatura del agua de mina de 3,7°C se pueden conseguir cerca de 765 kW térmicos utilizando un sistema de bombas de calor apropiado.

(Raymond, J. & Therrien 2008) elaboraron un modelo de elementos finitos para comprobar que el sistema no afectaba a la temperatura del agua de mina en el interior de la tierra y propusieron un método a seguir en futuros estudios de viabilidad en aprovechamientos geotérmicos de agua de mina.

El estudio concluye con la viabilidad positiva de un proyecto de construcción que utilice el potencial geotérmico de las minas Gaspé para calefactar ciertos edificios de la ciudad de Murdochville, utilizando intercambiadores de calor intermedios que aumenten la vida útil de las bombas de calor.



### Macizo del Rin, Alemania

Los estudios en Alemania no se quedan sólo en indicar minas concretas, sino que hay zonas enteras que pueden ser susceptibles del aprovechamiento energético del agua de sus minas. (Wieber, G. & Pohl 2008) señalan la zona de las montañas de pizarra del Rin, formación geológica que engloba parte del oeste de Alemania, el este de Bélgica, Luxemburgo y el Noreste de Francia. En las minas de esta zona se producía fundamentalmente mineral de hierro, pero también se obtenían menores cantidades de sulfuros de plomo, zinc y cobre. Se han estudiado 8 minas de las cuales se pueden encontrar datos en la tabla nº5:

| Mina                   | Profundidad (m) | Temperatura (°C) |
|------------------------|-----------------|------------------|
| Eupel                  | 500             | 21,6             |
| Georg                  | 640             | 21,8             |
| Neue Haardt            | 975             | 26,2             |
| Pfannenberger Einigket | 1070            | 23,6             |
| San Fernando           | 930             | 26,7             |
| Vereinigung            | 1000            | 31,7             |
| Wingertshardt          | 700             | 30,6             |

Tabla nº5. Minas del macizo Renano con potencial interés geotérmico (Wieber, G. & Pohl 2008)

### Recsk, Hungría

La mina de cobre abandonada en Recsk, al norte de Hungría, ha sido estudiada por (Tóth, A. & Bobok 2007) debido a sus interesantes parámetros geotérmicos. Tiene una profundidad de 1160 metros y se ha detectado que el agua del interior de la mina puede llegar a los 59,5°C encontrándose a 29°C en la superficie. La superficie de la mina es superior a 150.000 m<sup>2</sup> con una capacidad de transmisión de 0,108W/m<sup>2</sup>, lo que implica que la potencia calorífica de la mina pueda llegar a los 2.880 kW. El principal objetivo de la mina sería el de su uso como agua caliente sanitaria, sin embargo, se han propuesto también usos secundarios como, por ejemplo, calentar el Spa y las piscinas de un balneario cercano.

### Kongsberg, Noruega

Un sistema similar al ejecutado en la mina de Follidal se ha propuesto para la mina abandonada de Kongsberg, En su interior se puede encontrar un museo, una sala de conciertos y una sala para banquetes, a 342 metros por debajo de la superficie. La temperatura del aire en este complejo es de 6°C incluso en verano, por lo tanto, necesita de un sistema de calefacción para





poder llegar a unos niveles de confort aceptables. Se está diseñando un sistema que utilice el agua de la antigua mina para poder generar aire caliente; sin embargo, la calidad del agua de la mina hace imposible utilizar un circuito abierto, por lo tanto, se debe utilizar un circuito cerrado. Una tubería de entre 130 y 250 metros ha sido diseñada para recoger 12 kW de energía, no obstante, para las puntas de la instalación se necesitará un sistema auxiliar (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011).

### **Nowa Ruda, Polonia**

El estudio desarrollado por (Malolepszy 2003) se centra en una mina situada en Nowa Ruda que explotaba una veta de carbón hasta 660 metros de profundidad. La mina se encuentra abandonada e inundada con agua a una temperatura media de 21°C. El volumen de agua que se encuentra en la mina ha sido estimado en 5.000.000 m<sup>3</sup>, con una salinidad de entre 2 y 2,5 g/l de sólidos disueltos. En el estudio se desarrollaron dos escenarios en los que se extraía agua con un caudal de 10 l/s y 20 l/s, entregando aproximadamente 800 kW y 1.600 kW, respectivamente. El objetivo de la extracción del agua de la mina es la contribución en los sistemas de calefacción de una ciudad situada a menos 1 km, sin embargo, no se expresó un objetivo concreto.

La modelización térmica fue llevada a cabo utilizando un modelo numérico 2D basado en TOUGH2, desarrollado en la universidad de Berkeley, USA. Según el modelo se estimaba que debían pasar diez años desde que se cerrara la mina y se anegara hasta que la temperatura del agua llegara a su estado natural. Se sugirió que, si se ponía en explotación el sistema planteado a razón de 1,6 MW, la temperatura del agua descendería de 23°C a 18°C en 25 años. Esta reducción de la temperatura del agua nos advierte que, si se extrae energía de las aguas de mina a un ritmo elevado y sin devolver dicha energía, por ejemplo, utilizándola para refrigerar en verano, entonces la calidad de la fuente se irá degradando con el tiempo (Malolepszy 2003).

### **Czeladz, Polonia**

El municipio de Czeladz (35.000 habitantes) es una de las áreas de Centro Europa con mayor potencial para su desarrollo geotérmico a través del aprovechamiento energético del agua de mina (Malolepszy, Z., Demollin-schneiders, E. & Bowers 2005). En este área hay una mina de carbón abandonada desde 1992, llamada "Saturn", e inundada hasta unos 200 metros por debajo de la superficie. El agua de mina tiene una temperatura media de 14°C y puede ser usada en un sistema de calefacción y refrigeración. El agua de mina es bombeada con un caudal de 400 l/s y se estima que en la mina habría una potencia térmica de 2,5 MW<sub>t</sub>. La



energía obtenida de las aguas de mina se utilizará para calentar el complejo donde se situaban las antiguas casas de los mineros, ahora rehabilitadas. El enfoque innovador del proyecto puede fomentar la gestión sostenible de energía en toda la región.

### **Krimich II mine (República Checa)**

(Uhlík, J. & Baier 2012) estudiaron el potencial térmico del agua de la mina Krimich II en la República Checa llegando a la conclusión de que se podían extraer 1,66 MW térmicos a través de un sistema de bombeo que extrajera 40 l/s y una bomba de calor.

### **Midlothian, Escocia, Reino Unido**

El ayuntamiento de Midlothian ha desarrollado un proyecto relacionado con las aguas de mina, considerado como un ejemplo viable por el Minewater Project (Malolepszy, Z., Demollinschneiders, E. & Bowers 2005). Shawfair se trataría de una ciudad con 5.000 nuevas casas al sureste de Edimburgo, en el entorno de la antigua mina de Monktonhall. Se sigue bombeando un caudal de agua de mina de 100 l/s, a una temperatura de 13°C, para evitar manantiales inesperados. Algunos estudios han postulado que en el punto más bajo de la mina la temperatura del agua puede llegar a tener 37°C (Hall, A., Scott, J. A. & Shang 2011). El agua bombeada es actualmente desaprovechada y arrojada a un río cercano, por lo tanto, se ha propuesto utilizar la geotermia de baja entalpía proveniente de la mina abandonada para crear un sistema de calefacción para toda la ciudad. El agua de mina no será utilizada directamente en el sistema de calefacción, sino que se hará pasar por unas bombas de calor que producirán agua caliente a 60°C. El agua de mina, tras su paso por las bombas de calor, se devolverá a la mina por pozos de retorno situados a 2 km de distancia aproximadamente del pozo de Monktonhall. Esta idea sigue en desarrollo por parte del ayuntamiento actualmente, pero aún no ha comenzado la construcción en sí.

### **Morlais mine South Wales y Dunston mine**

(Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop 2004) estimaron el potencial térmico de las minas de Morlais y Dunston en Gales del Sur, en 2,94 MW y 470 kW respectivamente, asumiendo un COP de 3,5 en ambas instalaciones y un caudal de 100 l/s para la primera y 20 l/s para la segunda.

### **Pittsburg, Pensilvania, EEUU**

En Pittsburg un estudio sobre una mina de carbón ha revelado que aproximadamente un tercio de la misma está inundada con agua a temperaturas de entre 10°C y 13°C, lo que supone un



total de 5.000 km<sup>2</sup> de superficie inundada (Watzlaf, G. & Ackman 2006). El volumen de agua estimado es de  $5,15 \times 10^{12}$  litros mientras que las reservas de energía estimadas son de 437.000 MWh. Este agua puede usarse como soporte de sistemas de calefacción, pero no se han llevado a cabo modelizaciones hasta la fecha.

### 2.4.3. Aprovechamiento de las aguas de mina como recurso hidroeléctrico

Actualmente, existen pocas alternativas tecnológicas para el almacenamiento energético a gran escala. El 99% de almacenamiento de energía eléctrica mundial se corresponde con centrales hidroeléctricas reversibles (PHS) (Menéndez, J., Loredo, J., Fernandez, J. M. & Galdo 2017) con una potencia instalada superior a 95 GW en más de 300 centrales (Deane, J. P., Ó Gallachóir, B. P. & McKeogh 2010). Este tipo de centrales proporcionan energía eléctrica en un corto periodo de tiempo y por ello son utilizadas para regular las fluctuaciones de la demanda eléctrica (Aneke, M. & Wang 2016). Su funcionamiento consiste en el traspaso de agua entre dos embalses a distinta altura. Cuando la energía eléctrica es barata (horas valle), o cuando hay un exceso de potencia en la red, se bombea el agua del embalse inferior al superior. Posteriormente, cuando el precio de la electricidad es mayor, o cuando se necesite por razones de demanda, se turbinan el agua almacenada en el embalse superior hasta recogerse de nuevo en el embalse inferior. Su eficiencia varía entre el 65% y el 85% (Ibrahim, H., Ilinca, A. & Perron 2007; Suberu, M.Y., Mustafa 2014; Mahlia, T.M.I., Saktisahdan, T.J., Jannifar, A., Hasan, M.H., & Matseelar 2014; Koohi-Kamali, S., Tyagi, V.V., Rahim, N.A., Panwar, N.L. & Mokhlis 2013) llegando a ser en algunos casos del 87% (Aneke, M. & Wang 2016).

En la tabla nº6 se pueden ver los diez países con mayor potencia instalada de centrales PHS y su potencia instalada en el año 2017:



| País           | Potencia instalada (MW) |
|----------------|-------------------------|
| Japón          | 27.438                  |
| China          | 21.545                  |
| Estados Unidos | 20.858                  |
| Italia         | 7.071                   |
| España         | 6.889                   |
| Alemania       | 6.338                   |
| Francia        | 5.894                   |
| India          | 5.072                   |
| Austria        | 4.808                   |
| Corea del Sur  | 4.700                   |

Tabla nº6. Potencia instalada de centrales PHS por países (Menéndez, J., Loredó, J.,  
Fernandez, J . M. & Galdo 2017)

En muchas ocasiones el embalse inferior se encuentra en ríos y cauces naturales, aunque una alternativa plausible es utilizar un embalse inferior enterrado. Un ejemplo curioso es el promovido por el Proyecto ENE en Estonia en el que se utiliza como embalse superior el mar y como embalse inferior cavidades resultantes por excavaciones de granito (Menéndez, J., Loredó, J., Fernandez, J . M. & Galdo 2017).

En general, las aguas de mina como recurso hidroeléctrico están menos desarrolladas que las utilizadas como recurso geotérmico, existen menos ramas de investigación y menos plantas piloto desarrolladas. Lo más habitual es utilizar minas abandonadas, que hayan sido inundadas, como embalses de una central hidroeléctrica reversible (Pujades, E., Willems, T., Bodeux, S., Orban, P. & Dassargues 2016).

A pesar de los beneficios que este tipo de instalaciones pueden proporcionar, son pocas las referencias bibliográficas de centrales eléctricas reversibles subterráneas (Sabihuddin, S., Kiprakis, A.E. & Mueller 2015). Existen diversos estudios propuestos pero la gran inversión inicial o la gran complejidad técnica, en concreto, los problemas relacionados con el comportamiento del terreno, ha impedido que muchos de ellos lleguen a llevarse a cabo (Pujades, E., Orban, P., Bodeux, S., Archambeau, P., Epicum, S. & Dassargues 2017). Otros problemas con los que se suele encontrar este tipo de actuaciones es el rechazo popular o la dificultad de obtener los permisos necesarios, como ocurrió en la ciudad austriaca de Ritten en Tirol del Sur, donde la empresa KELAG AG promovió un proyecto hidroeléctrico con cámara subterránea que fue paralizado por los motivos antes mencionados (Madlener, R. & Specht 2013).



No obstante, la creciente demanda de energía procedente de fuentes renovables hace que este tipo de centrales puedan empezar a desarrollarse muy pronto (Aneke, M. & Wang 2016). De hecho, según (Sabihuddin, S., Kiprakis, A.E. & Mueller 2015), aproximadamente un cuarto de los proyectos que se están desarrollando para la implementación de las centrales reversibles convencionales incluyen un embalse subterráneo, lo que hace pensar que pronto puede verse una mina abandonada reutilizada como embalse inferior de una central reversible.

#### **2.4.3.1. Ejemplos**

La primera idea al respecto de explotar minas abandonadas como un embalse subterráneo data de 1960 (Harza 1960).

En 1975 se propuso en Nueva Jersey el uso de unas minas abandonadas como el embalse inferior de un central reversible, en lo que se llamó el Proyecto Mount Hope, desgraciadamente, el proyecto nunca llegó a ejecutarse (Moore 1981).

Durante los años 80 del pasado siglo, se desarrolló un proyecto en Holanda (Braat K.B., Van-Lohuizen 1985) para implantar una central hidroeléctrica reversible con su cámara inferior bajo tierra pero debido a las características del terreno no fue posible su ejecución.

(Wong 1996) propuso en 1996 perforar una serie de túneles en la cantera de granito de BukitTimah en Singapur para ser usados como embalses subterráneos de una central hidroeléctrica reversible. De esta manera el embalse superior sería la propia cantera mientras que un conjunto de cavidades conformaría el embalse inferior. Desgraciadamente, no se ha encontrado bibliografía que exponga la culminación de este proyecto.

(Madlener, R. & Specht 2013) presentaron un análisis tecno-económico de la posible construcción de centrales hidroeléctricas reversibles utilizando minas de carbón abandonadas en la zona de Ruhr (Alemania). Además, el auge de las renovables en los mix energéticos de los países hace que este tipo de centrales sean cada vez más demandadas debido a su capacidad reguladora.

También en esta zona, se ha desarrollado recientemente un proyecto para el aprovechamiento hidroeléctrico de la mina ProsperHaniel por parte de (Alvarado, R., Niemann, A. & Schwanenberg 2013). En este proyecto se utilizaban parte de las instalaciones abandonadas de la mina para ejecutar una central hidroeléctrica reversible.

En estudios llevados a cabo en Alemania y Holanda se ha mencionado que podría haber aproximadamente 100 minas con los condicionantes necesarios para llevar a cabo este tipo de actuaciones. La altura requerida entre los embalses debería ser de entre 400 y 800 metros



hasta un máximo de 1.750 metros (Auer, J. & Keil 2012). Una de las mayores ventajas de estos proyectos es que no se necesita invadir terrenos en la superficie y, por lo tanto, si se actúa correctamente, el impacto ambiental es considerablemente menor. Por otro lado, las galerías de las minas deberían reforzarse para que no se produzcan colapsos durante la operación de la planta. Cabe destacar que el sector de la minería y de las centrales reversibles convencionales ya tiene la tecnología necesaria para poder desarrollar este tipo de centrales.

### Nassfeld, Austria

El único proyecto puesto en marcha que combina una central hidroeléctrica reversible con una caverna subterránea, que se ha encontrado entre la bibliografía consultada, ha sido la expansión de la central de Nassfeld en Austria. Esta ampliación se puso en operación en 2006. La motivación del desarrollo del proyecto fue la ampliación del embalse inferior de la central reversible de Nassfeld construida en 1980-82 por razones económicas. Debido a diversos problemas técnicos, medioambientales y legales no se podía llevar a cabo la ampliación de dicho embalse en superficie y por ello se decidió establecer un sistema de tuberías subterráneas. En menos de 6 meses se excavaron 160.000 m<sup>3</sup> de roca y 1.950 metros con sección ovalada (7,5x14,6 m) y el coste de la obra fue de 8.000.000 € aproximadamente (Madlener, R. & Specht 2013).

### España

En España se ha hablado mucho de la central hidroeléctrica reversible que Endesa quiere construir en A Coruña aprovechando el lago artificial de la mina a cielo abierto de As Pontes. La actuación está al menos a nivel de anteproyecto y Red Eléctrica Española (REE) ya ha comunicado su intención de incentivar este tipo de actuaciones para dotar de mayor flexibilidad al mix energético español.

(Jardón, S., Ordóñez, Al., Álvarez, R., Cienfuegos, P. & Loredó, J. 2013) propusieron evaluar la opción de ejecutar balsas en superficie, en las minas de la cuenca central asturiana, para almacenar agua que posteriormente fuera conducida hasta niveles inferiores de las minas y mediante microturbinas aprovechar la energía potencial del agua para convertirla en electricidad. En las horas valle eléctricas se utilizarían unas bombas para bombear agua a la balsa de superficie para volver así a tener agua disponible para turbinar en horas pico.

(Menéndez, J., Loredó, J., Fernández, J. M. & Galdo 2017) también estudiaron las minas de este entorno geográfico analizando la viabilidad de instalar un aprovechamiento hidroeléctrico de agua de mina en un total de nueve minas que aún se encontraban sin inundar. Las



características del aprovechamiento tipo desarrollado para las nueve minas se encuentran en la tabla nº7.

| Característica   | PSH    |
|--|--------|
| Coste total (M€)                                       | 40     |
| Coste/kW (€)   | 1.701  |
| Longitud del embalse inferior (m)                      | 5.700  |
| Sección transversal embalse inferior (m <sup>2</sup> ) | 30     |
| Altura del salto (m)                                   | 300    |
| Volumen (m <sup>3</sup> )                              | 17.000 |
| Caudal (m <sup>3</sup> /s)                             | 8      |
| Potencia (MW)  | 23,52  |
| Producción al 100% de capacidad (h)                    | 6      |

Tabla nº7. Características aprovechamiento hidroeléctrico tipo en las minas de la cuenca central asturiana (Menéndez, J., Loredo, J., Fernandez, J. M. & Galdo 2017).

En diciembre de 2018 se le ha dado el visto bueno ambiental a una central hidroeléctrica reversible que utilizará el agua de las minas de Alicia y Julia situadas entre Fabero, Vega de Espinareda y Berlanda, en la provincia de León, para generar electricidad (Tascón 2018).

La obra, promovida por la empresa Central Depuradora Reversible del río Cúa, supone el primer aprovechamiento hidroeléctrico que utilice agua de mina en nuestro país y sus beneficios serán dobles: por un lado, supone la generación de electricidad con fuentes renovables, y por otro mejora la situación ambiental de la zona tratando el agua contaminada que sale de las minas abandonadas antes de verterlas al río Cúa de nuevo.

El sistema proyectado incluye la instalación del grupo de turbinas con una potencia instalada de 468 MW, mientras que en el grupo de bombeo se encontrarían 588 MW de potencia instalada, que funcionarían únicamente durante la noche. El salto hidroeléctrico será de 570 metros transportando el agua un total de 10 km para conseguir la cota suficiente. La inversión prevista para el proyecto se acerca a los 200 millones de euros lo que proporcionará un gran ímpetu económico en la comarca (Alonso 2013).



## CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO





### 3. ÁREA DE ESTUDIO

En el primer capítulo de esta tesis se realizó una introducción sobre el Valle Laciana centrándose fundamentalmente en la geografía, localización y organización territorial del mismo. En el presente capítulo se amplía la información describiendo con detalle las principales características del área de estudio.

Es fundamental conocer las características particulares del área donde se pretende realizar un estudio de aprovechamiento energético. Esto es debido a que estas características pueden afectar sustancialmente a la eficiencia de sistema e incluso a su viabilidad.

Son muchos los atributos generales relacionados con un área geográfica, como por ejemplo la fauna y la flora, presente en la zona, o el patrimonio cultural catalogado. A continuación, se van a desarrollar las características del área de estudio relacionadas con el objeto de esta tesis doctoral, es decir, el aprovechamiento energético de las aguas de mina del Valle Laciana y se va a exponer la justificación de su desarrollo.

- **Contexto climático:** Se considera necesario desarrollar una descripción detallada de las características climáticas de la zona de estudio para poder estimar las necesidades de calefacción que pudieran necesitar sus habitantes. La demanda energética de la población podría ser cubierta o parcialmente cubierta por un sistema de calefacción que utilice el agua de mina como fuente térmica.
- **Contexto geológico:** La geología de la zona es una característica fundamental para conocer la naturaleza de las aguas subterráneas presentes en la misma. Un estudio del contexto geológico del Valle Laciana ayudará a interpretar los resultados de los ensayos de campo que serán realizados en la caracterización de las aguas de mina.
- **Contexto hidrogeológico:** El marco hidrogeológico describe la relación de las aguas subterráneas presentes en el área de estudio con su geología.
- **Síntesis minera:** El Valle de Laciana tiene una profunda tradición minera desde principios del S. XX. El desarrollo minero de la zona ha propiciado la existencia de la infraestructura minera que se pretende reutilizar en el objeto del presente trabajo. El conocimiento de la historia minera del Valle resulta fundamental para entender el legado que se tiene actualmente.
- **Contexto socioeconómico:** La evolución económica y demográfica del Valle y sobre todo la situación actual del mismo es determinante a la hora de impulsar cualquier iniciativa industrial.

### 3.1. CONTEXTO CLIMÁTICO

La montaña noroccidental leonesa se caracteriza por tener unos inviernos duros con copiosas nevadas y unos veranos suaves con temperaturas inferiores a las registradas en el resto de la península.

La localidad de Villablino cuenta con una estación meteorológica situada al noreste del embalse de las Rozas, la cual registra temperatura, precipitaciones, dirección e intensidad del viento y humedad relativa desde 2010. La localización de esta estación se puede ver en la figura nº13.



Figura nº13. Localización de la estación meteorológica de Villablino (AEMET 2019).

Se han recopilado tanto los datos meteorológicos recogidos por esta estación como datos de estaciones cercanas que puedan tener cierta relevancia a la hora de interpretar los datos de ésta y que están disponibles en abierto por parte de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). También se han consultado estudios sobre predicciones meteorológicas en la zona del Valle Laciana.

#### 3.1.1. Estudios climatológicos predictivos del Valle Laciana

En el estudio elaborado por la empresa **Meteoblue**, en colaboración con la universidad de Basilea, se han realizado una serie de predicciones meteorológicas para conocer datos



meteorológicos del Valle Laciana. Las predicciones de la climatología de Villablino para los años 2018 y 2019 se pueden consultar en las siguientes figuras nº14 y nº15.

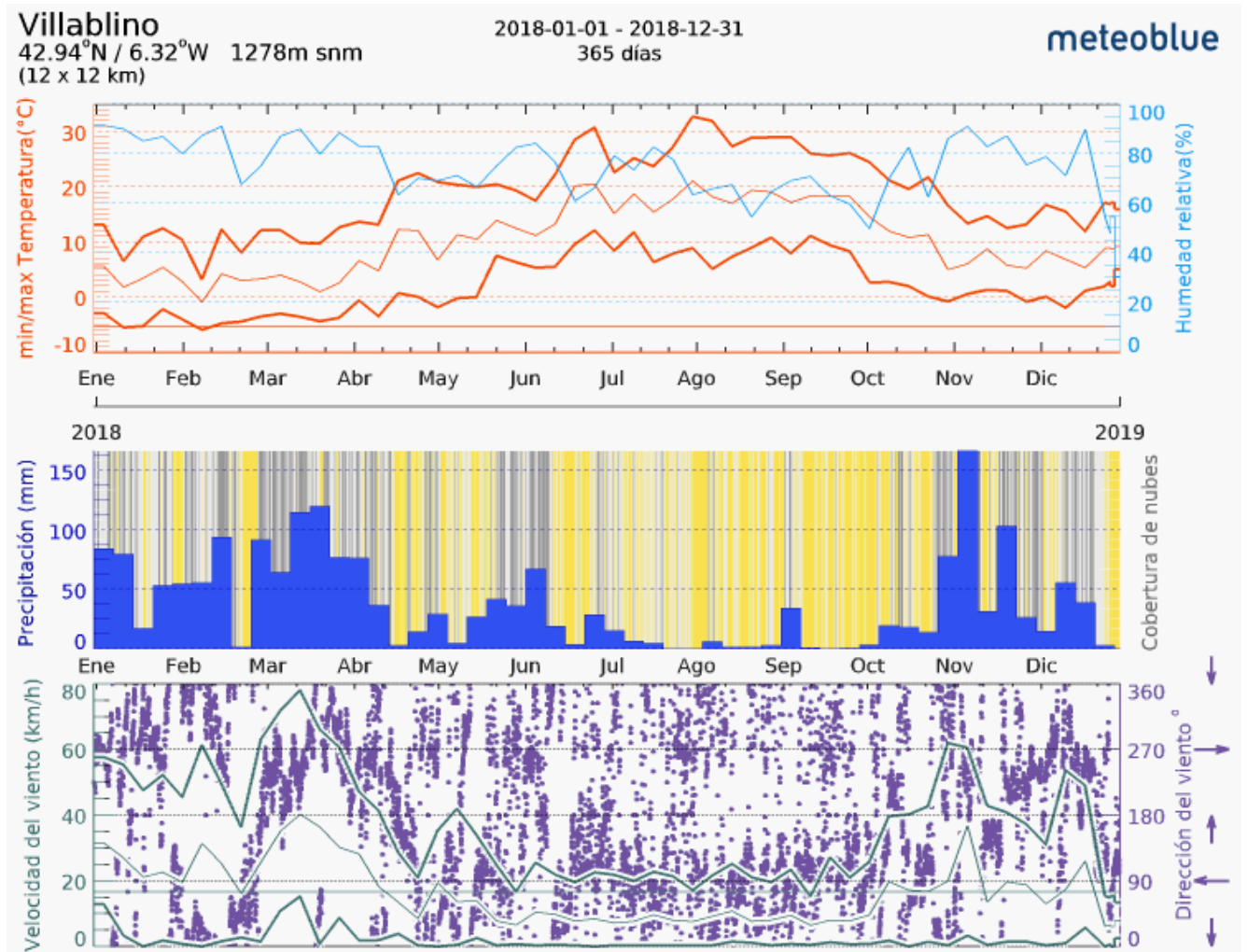


Figura nº14. Datos meteorológicos de Meteoblue para Villablino en el año 2018 (Meteoblue 2019).

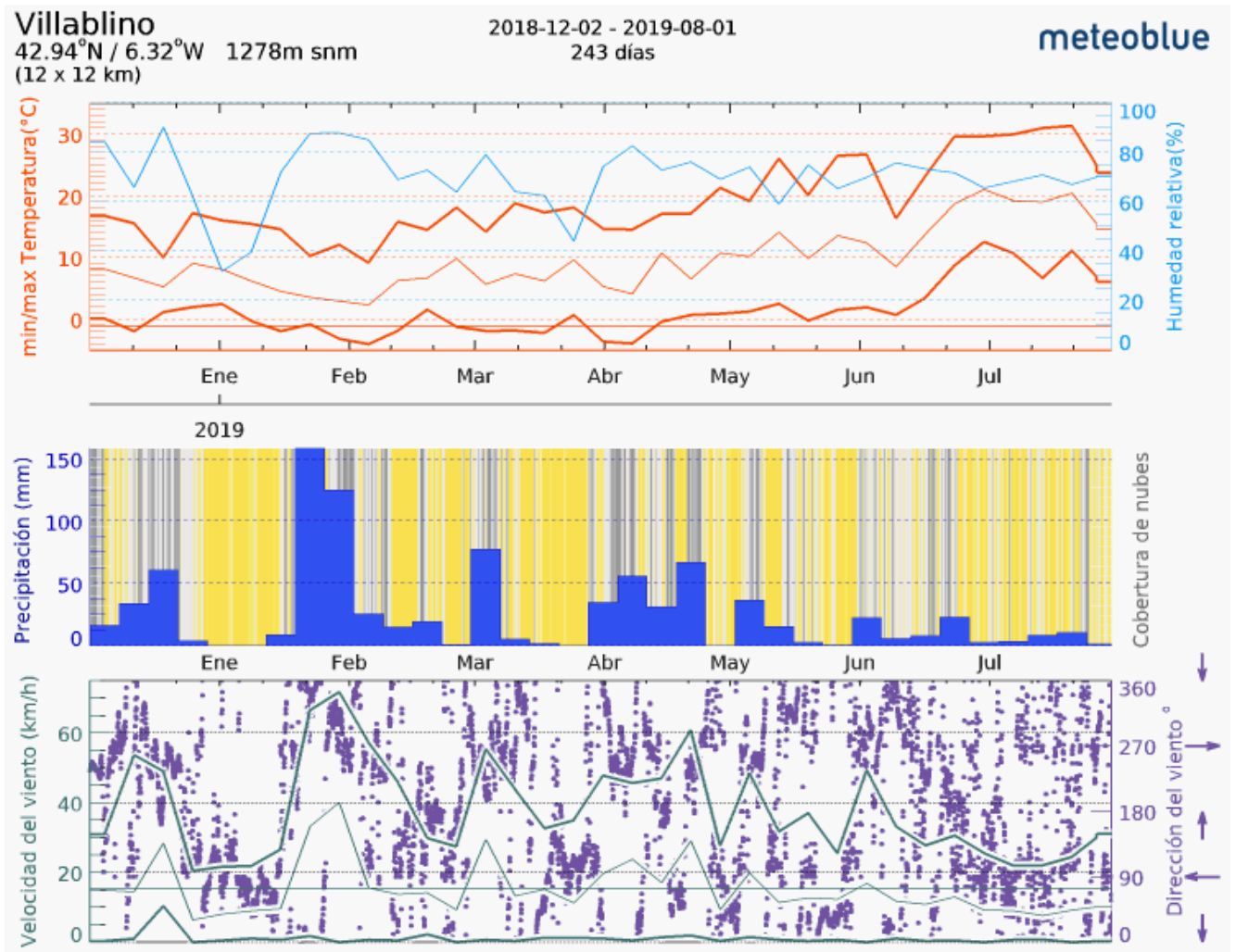


Figura nº15. Datos meteorológicos de Meteoblue para Villablino en el año 2019 (Meteoblue 2019).

Como se puede observar en los gráficos anteriores, según el estudio de Meteoblue el valor mínimo de temperatura en los años 2018 y 2019 se registró el 17 de enero de 2018, con un valor correspondiente a  $-6^{\circ}\text{C}$ , mientras que la máxima temperatura se registró el 28 de julio de 2018, con un valor correspondiente a  $33^{\circ}\text{C}$ .

Por su parte, la empresa Cedar Lake Ventures, Inc. ha desarrollado un proyecto llamado **Weather Spark** en el que se estiman los parámetros meteorológicos a través de los datos registrados por estaciones cercanas (Cedar-Lake-Venture 2018).

En el estudio realizado para Villablino se han utilizado las estaciones meteorológicas que se pueden observar en la tabla nº8. En esta tabla se muestran las principales características de las estaciones meteorológicas utilizadas.



| Estación meteorológica            | Distancia a Villablino (km) | Dirección | Contribución (%) | Inicio | Fin  | Serie datos (años) |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------|------------------|--------|------|--------------------|
| Aeropuerto de Asturias            | 73                          | Norte     | 27               | 1968   | 2019 | 51                 |
| Braganza                          | 124                         | Sur       | 27               | -      | -    | -                  |
| Aeropuerto Santiago de Compostela | 171                         | Oeste     | 16               | 1994   | 2019 | 25                 |
| Aeropuerto de A Coruña            | 172                         | Oeste     | 14               | 1931   | 2019 | 88                 |
| Aeropuerto de Valladolid          | 183                         | Sureste   | 17               | 1973   | 2019 | 46                 |

Tabla nº8. Estaciones meteorológicas usadas en el estudio Weather Spark.

La metodología que utiliza el proyecto “Weather Spark” se basa en hacer un promedio de las variables meteorológicas de las distintas estaciones señaladas. Los valores se ponderan por la inversa de la distancia entre la estación y el punto de estudio y se corrigen en función de la diferencia de altitud en conformidad con la International Standard Atmosphere. Los datos utilizados en el estudio son los datos horarios entre las 8:00 y las 21:00 recogidos por las estaciones de referencia en una serie de 36 años, del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2016.

- Temperatura

Los resultados de temperatura de este estudio se pueden ver figura nº16.

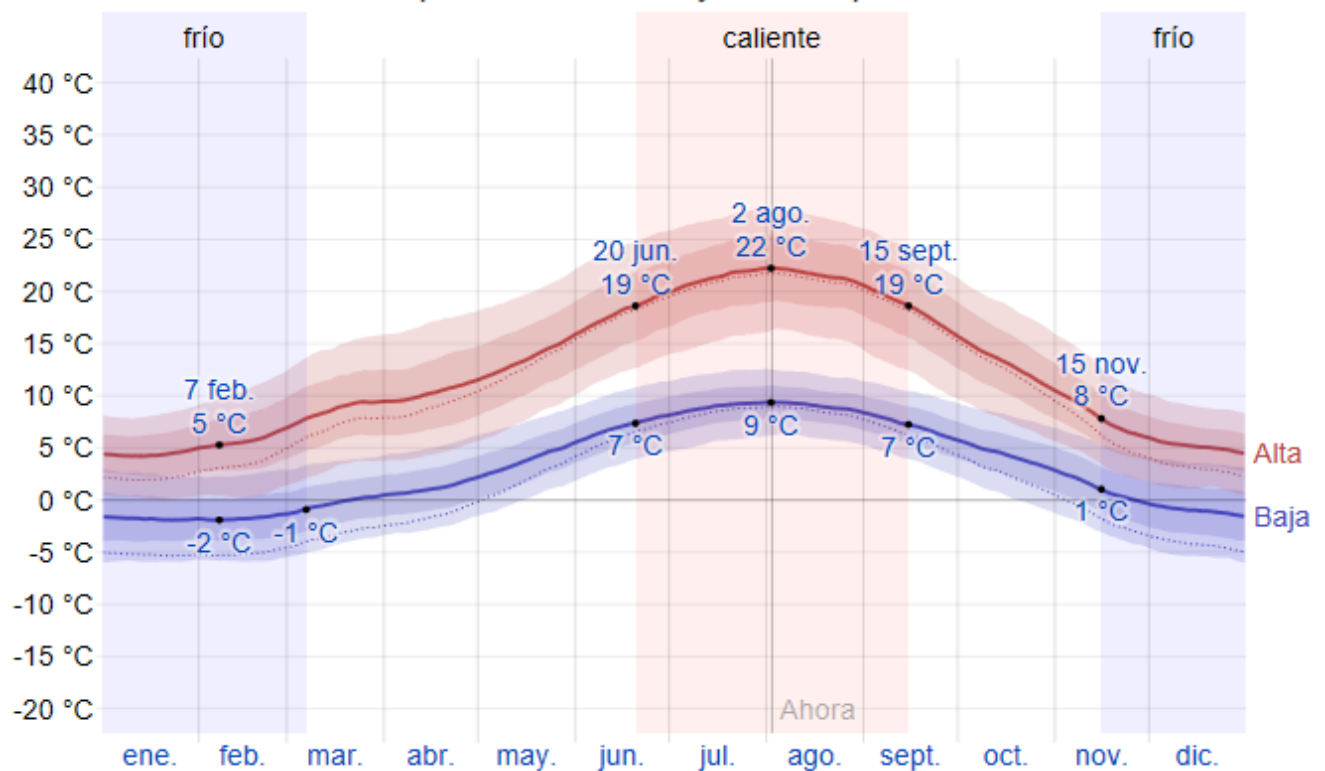


Figura nº16. Temperaturas máximas y temperaturas mínimas promedio (Cedar-Lake-Venture 2018).

Las líneas roja y azul reflejan las temperaturas máximas y mínimas promedio respectivamente, mientras que las franjas que se sitúan paralelamente a ellas son las bandas de los percentiles 25% a 75%, y 10% a 90%. Como se puede observar, el día con mayor temperatura máxima promedio del año es el 2 de agosto con una temperatura promedio máxima de 22°C, siendo el día del año con menor temperatura mínima promedio el 7 de febrero con una temperatura de -2°C.

Cuando se hace el estudio de temperaturas máximas y mínimas promedio por horas las temperaturas bajan como se muestra en la figura nº17.

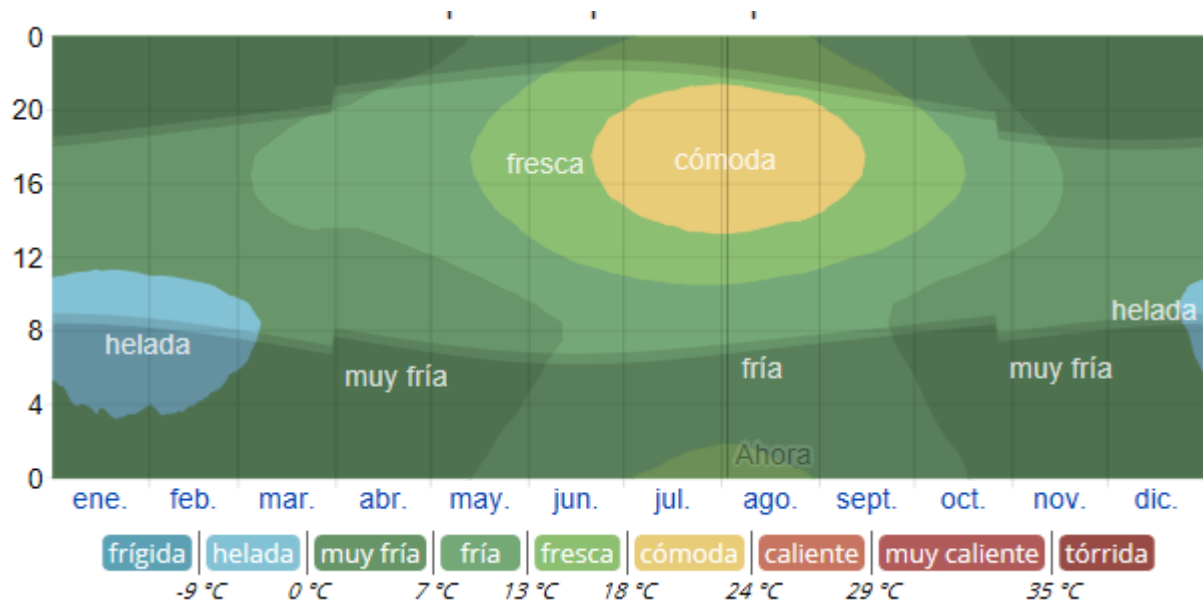


Figura nº17. Temperaturas promedio por horas (Cedar-Lake-Venture 2018).

- Precipitaciones

Los resultados de precipitaciones de este estudio se pueden ver en la figura nº18:

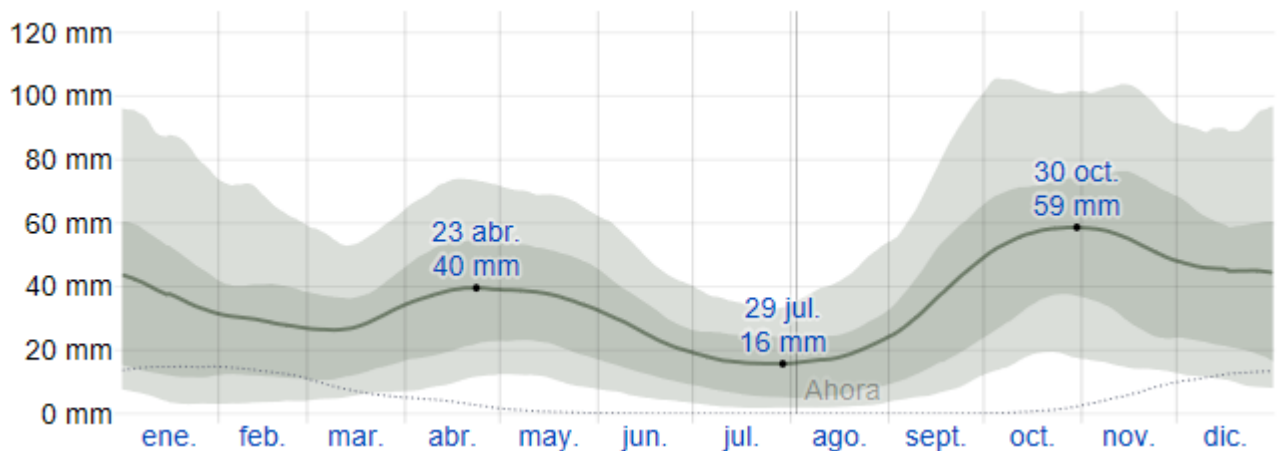


Figura nº18. Precipitación de lluvia mensual promedio (Cedar-Lake-Venture 2018).

En la figura nº18 se muestra la lluvia acumulada en un periodo móvil de 31 días centrados en cada día del año, de esta manera se consigue mostrar la variación mensual de las precipitaciones y no únicamente la precipitación acumulada mensual total.

El periodo de 31 días en el que más llueve en Villablino es el que se encuentra centrado en el 30 de octubre, es decir, del 15 de octubre al 16 de noviembre aproximadamente, con una



acumulación total promedio de 59 milímetros. Mientras que el periodo más seco del año es el centrado en el día 29 de julio, cuya acumulación total promedio es de 16 milímetros.

Las franjas grises que se sitúan paralelamente a la línea de precipitación mensual promedio son las bandas de los percentiles 25% a 75%, y 10% a 90%.

Según este estudio la precipitación promedio a lo largo del año es aproximadamente de 431 mm. Este resultado contrasta con los datos de precipitación media anual que muestra el **Atlas del Medio Natural de la provincia de León** (ITGE) (E. Alonso 1995), los cuales se resumen en la tabla nº9.

|                     | <b>T</b> | <b>m</b> | <b>M</b> | <b>P</b> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| Caboalles de abajo  | -        | -        | -        | 1.759    |
| Caboalles de arriba | -        | -        | -        | 1.360    |
| Leitariegos         | 5        | -5,6     | 3,7      | -        |
| Villablino          | 7,7      | -3,5     | 5,8      | 1.437    |
| Villaseca           | 7,2      | -3,9     | 5,4      | 1.162    |

Tabla nº9. Parámetros meteorológicos del Valle Laciana según (E. Alonso 1995).

Siendo:

T: Temperatura media anual (°C)

m: Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)

M: Temperatura media de las máximas del mes más frío (°C)

P: Precipitación anual media (mm)

Los valores de temperaturas tenidos en cuenta en el Atlas señalado anteriormente se han extrapolado de acuerdo con la propuesta de Garmendia Iraundegui (1968), teniéndose en cuenta la distancia al observatorio fuente, que los puntos de observación se encuentren en el mismo valle y que haya una exposición similar (E. Alonso 1995). De esta manera, la estación referencia para los datos de temperatura de Villablino y Villaseca fue la estación de Leitariegos.





### 3.1.2. Datos tomados de AEMET

La Agencia Estatal de Meteorología tiene una densa red de estaciones pluviométricas que recogen datos relativos a la meteorología en todas las provincias de España. La Agencia realiza numerosas publicaciones y mapas entre los que se destacan los mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016) (Chazarra, A., Flórez, E., Peraza, B., Tohá, T., Lorenzo, B., Criado, E., Moreno, J.V., Romero, R. & Botey 2018), de los cuáles se ha extraído la información sobre la climatología en el Valle de Laciana mostrada en la tabla nº10.

| Parámetro  | T <sup>a</sup> media anual (°C) | T <sup>a</sup> media mensual (°C) | T <sup>a</sup> media max. anual (°C) | T <sup>a</sup> media max. mensual (°C) | T <sup>a</sup> media mín. anual (°C) | T <sup>a</sup> media mín. mensual (°C) | Precip. media anual (mm) | Precip. media mensual (mm) |
|------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
| Anual      | 5,0-7,5                         |                                   | 15,0-17,5                            |  | 0,0-2,5                              |  | 1.000-1.400              |                            |
| Enero      |                                 | 0,0-2,5                           |                                      | 5,0-7,5                                |                                      | 0,0-(-2,5)                             |                          | 100-150                    |
| Febrero    |                                 | 0,0-2,5                           |                                      | 7,5-10,0                               |                                      | 0,0-(-2,5)                             |                          | 100-150                    |
| Marzo      |                                 | 5,0-7,5                           |                                      | 10,0-12,5                              |                                      | 0,0-2,5                                |                          | 70-100                     |
| Abril      |                                 | 7,5-10,0                          |                                      | 12,5-15,0                              |                                      | 0,0-2,5                                |                          | 70-100                     |
| Mayo       |                                 | 10,0-12,5                         |                                      | 15,0-17,5                              |                                      | 2,5-5,0                                |                          | 70-100                     |
| Junio      |                                 | 12,5-15,0                         |                                      | 20,0-22,5                              |                                      | 7,5-10,0                               |                          | 50-70                      |
| Julio      |                                 | 15,0-17,0                         |                                      | 25,0-27,5                              |                                      | 7,5-10,0                               |                          | 30-50                      |
| Agosto     |                                 | 15,0-17,0                         |                                      | 25,0-27,5                              |                                      | 7,5-10,0                               |                          | 30-50                      |
| Septiembre |                                 | 10,0-12,5                         |                                      | 20,0-22,5                              |                                      | 5,0-7,5                                |                          | 50-70                      |
| Octubre    |                                 | 7,5-10,0                          |                                      | 15,0-17,5                              |                                      | 2,5-5,0                                |                          | 100-150                    |
| Noviembre  |                                 | 5,0-7,5                           |                                      | 10,0-12,5                              |                                      | 0,0-2,5                                |                          | 100-150                    |
| Diciembre  |                                 | 0,0-2,5                           |                                      | 7,5-10,0                               |                                      | 0,0-(-2,5)                             |                          | 100-150                    |

Tabla nº10. Valores meteorológicos según los mapas climatológicos de AEMET.

### 3.1.3. Evaluación de datos meteorológicos

En este apartado se van a evaluar los distintos datos meteorológicos recopilados en los apartados anteriores.

Las variables escogidas para su evaluación han sido las siguientes:

- Temperatura media anual (°C)
- Temperatura media de las máximas anuales (°C)



- Temperatura media de las mínimas anuales (°C)
- Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)
- Temperatura media de las máximas del mes más frío (°C)
- Precipitación anual (mm)

Todas las variables antes reseñadas han sido recopiladas en al menos dos estudios permitiendo de esta manera la comparación entre los valores de los distintos estudios.

En primer lugar, se ha calculado la media ponderada de los valores recogidos en los mismos para cada una de las variables. La ponderación se ha ejecutado utilizando los factores mostrados en la tabla nº11.

| Estudios      | Factores de ponderación |
|---------------|-------------------------|
| AEMET         | 1,00                    |
| ITGE          | 1,00                    |
| Meteoblue     | 0,25                    |
| Weather Spark | 1,00                    |

Tabla nº11. Factores de ponderación

El factor de ponderación del estudio de Meteoblue es un cuarto más pequeño que el resto de los factores, esto implica que su contribución al valor de la media es cuatro veces menor. La razón por la que se ha minorado este factor es que el estudio llevado a cabo por Meteoblue sólo recoge datos del año 2018, mientras que el resto de los estudios recogen datos durante más de 25 años. Para evitar el sesgo que pudieran inducir los valores del año 2018 en la media final se ha decidido minorar el factor de ponderación del mencionado estudio.

Posteriormente se ha calculado la desviación típica de cada una de las variables y se ha expresado, en forma de porcentaje, la desviación de cada uno de los estudios respecto a la media, representando un 0% si el valor del estudio es igual a la media y un 100% si se desvía de la media la desviación típica. Los valores negativos y superiores al 100% significan que el valor de un estudio en concreto difiere de la media más que la desviación típica.

En la tabla nº12 se presenta la recopilación de las distintas variables analizadas obteniendo una temperatura media máxima anual de 14,7°C, una temperatura media mínima anual de 2,07°C y una precipitación anual media de 1.084,46 mm.



| Parámetros                  | Tra media anual | Tra media máx anual | Tra media min anual | Tra media mín mes más frío | Tra media max mes más frío | Precipitación anual |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>Media</b>                | 8,15            | 14,70               | 2,07                | -2,38                      | 6,03                       | 1.084,46            |
| <b>Desviación típica</b>    | 2,16            | 3,09                | 0,81                | 1,59                       | 0,32                       | 587,99              |
| <b>Mapa AEMET</b>           | 6,25            | 16,25               | 1,25                | -1,25                      | 6,25                       | 1.200,00            |
| <b>Desviación AEMET</b>     | -87,95%         | 50,02%              | -101,15%            | 70,71%                     | 70,71%                     | 19,65%              |
| <b>ITGE</b>                 | 7,70            | -                   | -                   | -3,50                      | 5,80                       | 1.437,00            |
| <b>Desviación ITGE</b>      | -20,83%         | -                   | -                   | -70,71%                    | -70,71%                    | 59,96%              |
| <b>Meteoblue (2018)</b>     | 10,50           | 18,33               | 2,17                | -                          | -                          | 1.826,00            |
| <b>Desviación Meteoblue</b> | 108,77%         | 117,40%             | 11,36%              | -                          | -                          | 126,11%             |
| <b>Weather spark</b>        | -               | 12,25               | 2,88                | -                          | -                          | 431,00              |
| <b>Desviación WS</b>        | -               | -79,37%             | 98,31%              | -                          | -                          | -111,13%            |

Tabla nº12. Evaluación de las variables meteorológicas

### 3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La geología del Valle Laciana es uno de los aspectos más determinantes en su desarrollo económico y demográfico debido a las explotaciones carboníferas que han tenido lugar en esta comarca. La gran cantidad de antracita y hulla presente en el Valle ha permitido su explotación desde el siglo XIX (Alcaraz 2003), lo que se convirtió en la actividad principal de la región durante todo el siglo XX.

La comarca de Laciana se encuentra en las hojas 101 (Villablino) y 076 (Pola de Somiedo) del mapa geológico nacional 1:50.000 (serie MAGNA) del Instituto Geológico y Minero de España. Integra una cuenca carbonífera estefaniense, discordante, que recubre parcialmente áreas de la Zona Asturoccidental-Leonesa (por el W), del antiforme del Narcea (por el centro y por el N y el S) y de la Zona Cantábrica (por el NE)..

En las figuras nº19 y 20 se puede ver el encuadre geológico de la Comarca de Laciana y los principales materiales geológicos encontrados en la misma.

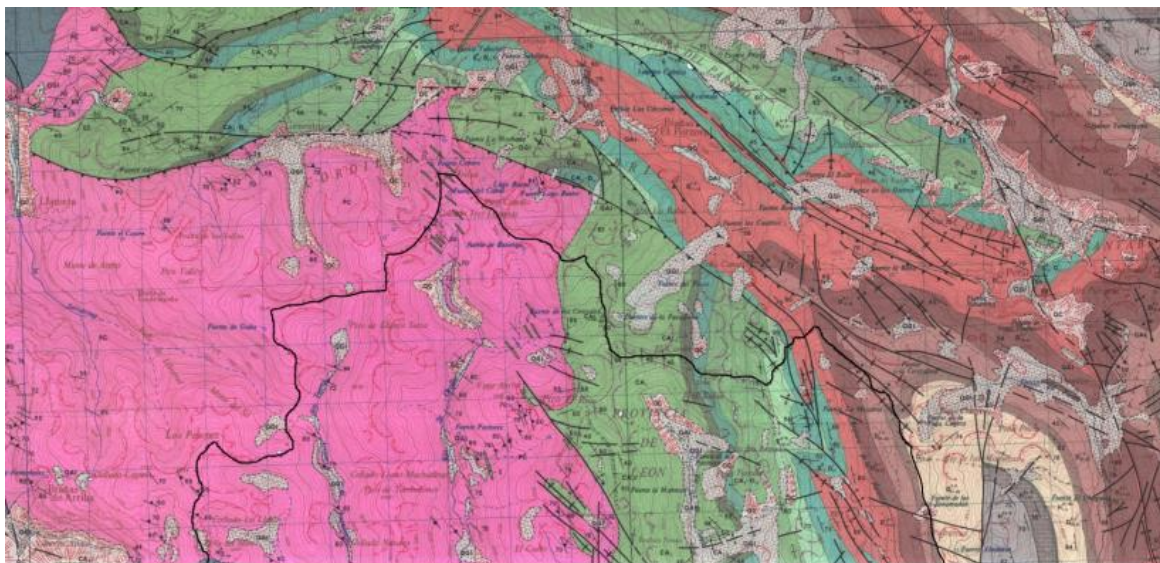


Figura nº19. Extracto de la hoja 076 del MAGNA con la zona norte de la comarca de Laciana

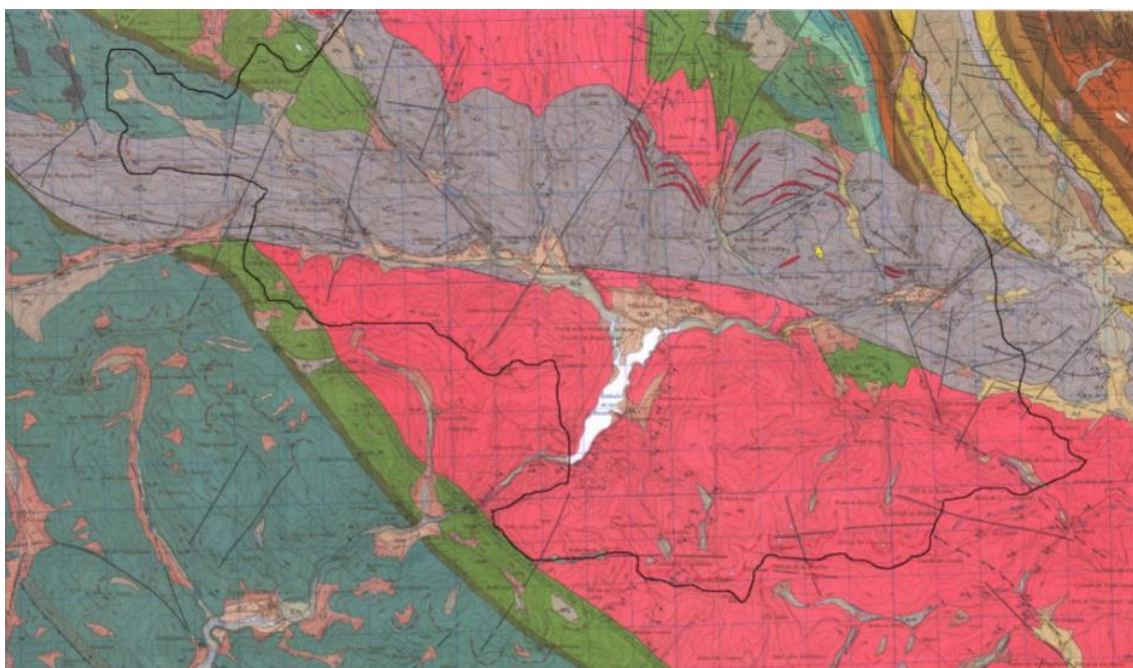


Figura nº20. Extracto de la hoja 101 del MAGNA con la zona sur de la comarca de Laciana

En la figura nº21 se muestran las leyendas de las hojas 076 y 101 de la colección MAGNA y que corresponden a los mapas de las figuras anteriores.



## LEYENDA

|                         |             |   |   |                   |                   |                   |                   |                           |
|-------------------------|-------------|---|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| <b>CUATER.</b>          | HOLOCENO    |   | Q <sub>2</sub> E                            | Q <sub>2</sub> Cd | Q <sub>2</sub> L  | Q <sub>2</sub> Al | Q <sub>2</sub> Al | Depósitos aluviales       |
|                         | PLEISTOCENO |   | Q <sub>2</sub> Mg                           | Q <sub>2</sub> T  | Q <sub>2</sub> Fg | Q <sub>2</sub> L  | Q <sub>2</sub> L  | Derrubios de ladera       |
| <b>CARBON. TERCIAR.</b> | NEOGENO     |   | T <sub>2</sub> <sup>a</sup> -Q <sub>1</sub> |                   |                   |                   | Q <sub>2</sub> E  | Depósitos eluviales       |
|                         | MIOCENO     |   | T <sub>2</sub> <sup>a</sup>                 |                   |                   |                   | Q <sub>2</sub> Fg | Depósitos fluvioglaciaros |
| <b>CARBON. SUPERIOR</b> | ESTEFAN.    | C | H <sup>a-a</sup> <sub>32-34</sub>           |                   |                   |                   | Q <sub>2</sub> T  | Terrazas                  |
|                         |             | B | H <sup>a-a</sup> <sub>32-34</sub>           |                   |                   |                   | Q <sub>2</sub> Mg | Morrenas                  |

T<sub>2</sub><sup>a</sup>-Q<sub>1</sub> Arcillas y arenas  
 T<sub>2</sub><sup>a</sup> Areniscas y calizas arenosas  
 H<sup>a-a</sup><sub>32-34</sub> Areniscas, pizarras y niveles de carbón  
 H<sup>a-a</sup><sub>32-34</sub> Brechas y conglomerados

### ZONA CANTABRICA

|                    |          |                               |                                |                                 |                                    |                                   |   |
|--------------------|----------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| <b>CARBONIFERO</b> | SUPERIOR | WESTFALIENSE                  |                                | H <sup>a-a</sup> <sub>1-2</sub> | Areniscas y pizarras (S. Emiliano) |                                   |   |
|                    |          | NAMURIENSE                    | C                              |                                 |                                    | H <sup>a-a</sup> <sub>1-1</sub>   | Caliza tableada negra (Barcaliente)             |
|                    |          |                               | B                              |                                 |                                    |                                   |   |
|                    | A        | H <sup>a</sup> <sub>1-1</sub> | Calizas nodulosas rojas (Alba) |                                 |                                    |                                   |   |
|                    | INFERIOR |                               |                                | DINANTIENSE                     | VISEIENSE                          |                                   |   |
|                    |          |                               |                                |                                 | TOURNAISIENSE                      | D <sup>2-3</sup> <sub>31-32</sub> | Cuarcitas y areniscas con algún nivel pizarroso |

|                 |          |               |                                   |   |                                   |                                       |                                   |                                       |
|-----------------|----------|---------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>DEVONICO</b> | SUPERIOR | FAMENIENSE    |                                   | D <sup>2-3</sup> <sub>31-32</sub>                             | Calizas (Portilla)                |                                       |                                   |                                       |
|                 |          | FRASNIENSE    | MEDIO                             |   |                                   | D <sup>1-3</sup> <sub>21-22</sub>     | Pizarras y areniscas (Huegas)     |                                       |
|                 |          |               | INFERIOR                          |   |                                   |                                       |                                   |                                       |
|                 |          | MEDIO         | GIVET.                            |   |                                   | SUPERIOR                              | D <sup>3-1</sup> <sub>12-21</sub> | Calizas (Santa Lucía)                 |
|                 |          |               | EIFEL.                            |   |                                   | INFERIOR                              | D <sup>1-3</sup> <sub>21-22</sub> | Dolomías, calizas y pizarras (La Vid) |
|                 |          | INFERIOR      | EMSIEM.                           |   |                                   | SUPERIOR                              | D <sup>1-3</sup> <sub>21-22</sub> |                                       |
| GEDIN.          | INFERIOR |               | D <sup>1-3</sup> <sub>21-22</sub> |   |                                   |                                       |                                   |                                       |
| <b>SILURICO</b> | SUPERIOR | WENLOCK.      | SUPERIOR                          | S <sup>a</sup> <sub>12-11</sub> -D <sup>1</sup> <sub>11</sub> | Areniscas ferruginosas (S. Pedro) |                                       |                                   |                                       |
|                 | INF.     |               | LLAND.                            | MEDIO   | S <sup>a</sup> <sub>12-11</sub>   | Pizarras negras (Formigoso)           |                                   |                                       |
| <b>ORDOV.</b>   | INFERIOR | ARENIGIENSE   |                                   | O <sub>12</sub>   | Cuarcitas blancas (Barrios)       |                                       |                                   |                                       |
|                 |          | TREMADOCIENSE |                                   | CA <sub>2</sub> -O <sub>1</sub>                               | Areniscas y pizarras (F. Ovillo)  |                                       |                                   |                                       |
| <b>CAMBRICO</b> | SUPERIOR |               | CA <sub>1</sub> -O <sub>1</sub>   |   | CA <sub>1</sub> -2                | Calizas y dolomías (F. Láncara)       |                                   |                                       |
|                 | MEDIO    |               | CA <sub>1</sub>                   |   | CA <sub>1</sub>                   | Areniscas feldespáticas (F. Herrería) |                                   |                                       |
|                 | INFERIOR |               | CA <sub>1</sub>                   |   |                                   |                                       |                                   |                                       |

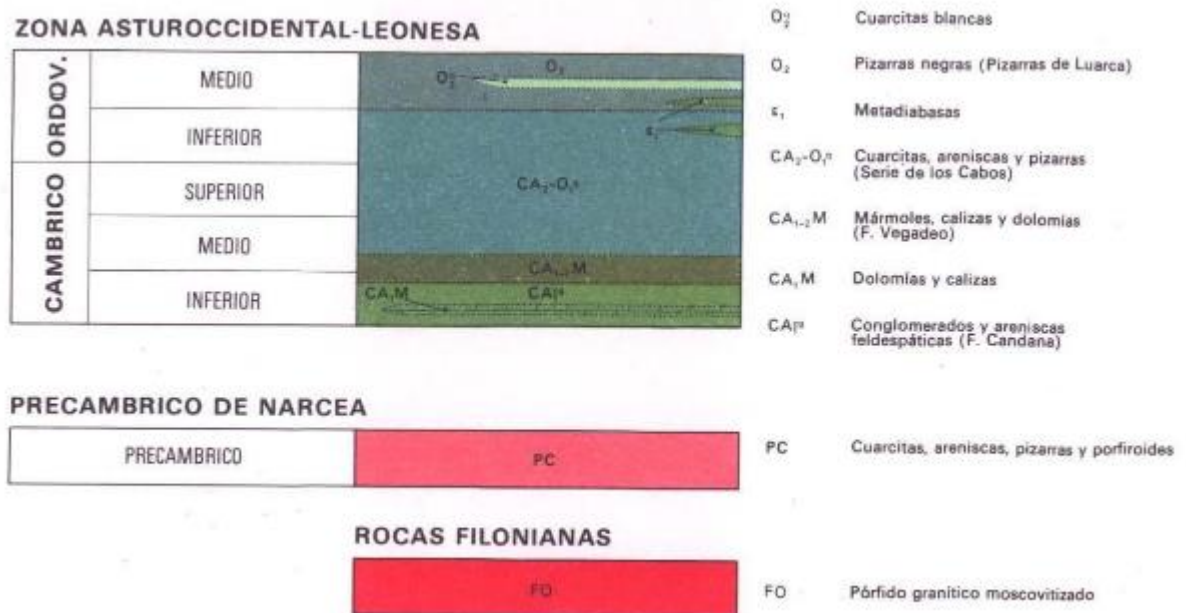


Figura nº21. Leyenda de la hoja 101 MAGNA 50.000 (IGME)

Los materiales geológicos identificados en el área de estudio se pueden encuadrar, cronoestratigráficamente, en los siguientes periodos:

- **Precámbrico:** Corresponde a cuarcitas, areniscas, pizarras y porfíroides señalados en el mapa con color rosa. Se pueden encontrar en dos zonas claramente diferenciadas dentro de la comarca de Laciana. La primera zona se encuentra al sur cuyo límite norte se trata de una falla Este-Oeste que lo separa de los materiales del Carbonífero. La otra zona remarcable se encuentra al noroeste de la comarca, delimitado al sur por el sinclinal carbonífero y al Este por materiales del Cámbrico y del Ordovícico.
- **Carbonífero:** En el valle se encuentran fundamentalmente materiales de edad Estefaniense, entre los que se encuentran areniscas, pizarras y niveles de carbón intercalados con rocas filonianas, que se disponen discordantes sobre el resto de unidades. Estos materiales se encuentran en una franja uniforme de 4 km de anchura que cruza la zona central de la comarca correspondiendo a la falda norte del valle.
- **Cámbrico y Ordovícico:** En el sector Noreste de la comarca de Laciana se encuentran una serie de franjas Norte-Sur de materiales pertenecientes al Cámbrico y Ordovícico formados fundamentalmente por areniscas, pizarras, calizas y dolomías. También se



encuentran en esta zona algunos materiales pertenecientes al Silúrico y al Devónico. Al W de la comarca, también hay afloramientos de rocas del Paleozoico Inferior, al norte de los sedimentos estefanienses discordantes, que pertenecen a las series de la Zona Asturoccidental-Leonesa.

### 3.2.1. Estratigrafía

#### 3.2.1.1. Precámbrico

Las rocas de esta edad afloran recurrentemente en la comarca de Laciana y se extienden desde la costa asturiana (Cudillero) hasta La Robla (León) formando un gran arco (IGME 1982). Su estratigrafía se divide en dos formaciones, una inferior que recoge los esquistos e intercalaciones porfiroides y otra superior donde se encuentran las pizarras, las cuarcitas y las areniscas. No obstante, la diferencia de estas formaciones es sutil debido a la complejidad tectónica (IGME 1982). Es de destacar el afloramiento en el río San Miguel, el cual discurre por la localidad de Villablino, donde se pueden observar areniscas y pizarras de color gris oscuro.

#### 3.2.1.2. Cámbrico y Ordovícico

Los materiales cámbricos y ordovícicos que se pueden encontrar al norte de la comarca de Laciana corresponden, en gran parte, a la formación Luarca y a la formación Agüeira (IGME 1982; T. Herrero 2014).

- La formación Luarca se generó en el Ordovícico medio y está formada por una serie masiva de pizarras negras que contienen una gran cantidad de pirita. Esta pirita se altera superficialmente a limonita y, en general, se encuentra cristalizada en forma de cubos. Sus principales componentes son mica blanca, cuarzo y clorita, normalmente impregnados por óxidos de hierro y grafito.
- La formación Agüeira se presenta sobre la formación previamente descrita y está constituida por grauvacas y pelitas fundamentalmente. Mineralógicamente, estas rocas están compuestas por plagioclasas y fragmentos de rocas (granito en el caso de las grauvacas) que son cementadas por una matriz limo-arcillosa.



### 3.2.1.3. Carbonífero

Durante este periodo se produjo una fosilización de los vegetales de la superficie, favorecida por su pertenencia a zonas pantanosas, y que actualmente forman los importantes yacimientos de carbón que han hecho famosa a esta zona de la Cordillera Cantábrica (Alcaraz 2003).

La franja Este-Oeste que cruza el Valle Laciana, al norte de Villablino, ha sido profundamente explotada desde el siglo XIX. Las explotaciones de antracita y hulla de esta zona no obtenían carbón de buena calidad debido a su alto contenido de volátiles, especialmente óxidos de azufre. Este hecho y la coyuntura económica y energética del país desde la década de los 90 ha desembocado en un abandono total de las minas de la zona (Alcaraz 2003).

Las series de esta edad resultan fácilmente identificable debido a la existencia de las instalaciones mineras y sus escombreras, las cuales destacan en el paisaje actual debido a sus fuertes pendientes y su altura (llegando algunas a los 100 metros) (Alcaraz 2003).

La franja de Villablino, antes mencionada, corresponde a materiales estefanienses de 4.000 metros de potencia formada por areniscas, lutitas, brechas, pudingas y capas de carbón. El espesor de las capas de carbón es muy variable y pueden ir desde los pocos milímetros hasta espesores de orden métrico (T. Herrero 2014). Esta franja constituye un sinclinal E-O apoyado entre materiales precámbricos y paleozoicos de forma asimétrica. Su flanco Norte buza hacia el Sur entre 40 y 45 grados mientras que su flanco Sur está muy afectado por la falla de Villablino (IGME 1982; Corrales 1971).

El ciclotema del estefaniense, en la cuenca de Villablino, se caracteriza por tener la siguiente estructura: Arenisca-Pizarra-Carbón-Pizarra-Arenisca. Los conglomerados que se encuentran en la zona suelen presentar cantos redondeados y fundamentalmente de cuarcita, lo que hace pensar que han tenido un largo transporte (Corrales 1971). El material cementante de las areniscas suele ser óxido de hierro y cloritas, encontrándose en raras ocasiones la sílice, aunque en la zona oriental de Villablino se encuentra carbonato cálcico como material cementante.

(Corrales, I. & Peláez 1966) llevaron a cabo un extenso estudio de reconocimiento geológico del estefaniense en la cuenca de Villablino estudiando un total de nueve afloramientos a lo largo de toda la franja:

- Corona
- Puente de las Palomas
- Peña Ereita
- Brañas de Villablino





- Brañas de Pando
- Carretera del Puerto de Leitariegos
- Cueto de Arbás
- Altos del Madorno
- Brañas de Narcea del Monasterio

En este estudio se detalla la estratigrafía del Estefaniense en todos los lugares antes mencionados, sin embargo, en esta tesis doctoral se va a reflejar únicamente la estratigrafía del afloramiento situado en las inmediaciones de las brañas de Villablino por ser la más cercana a los distintos emplazamientos estudiados.

La localización del afloramiento se sitúa cuatro kilómetros al Norte de San Miguel de Laciana, apoyándose la formación estefaniense sobre pizarras cuarcíticas del Precámbrico. El ciclotema del afloramiento se detalla a continuación:

1. Pudinga de cantos de pizarra y cuarcita, predominando los primeros. Matriz arenoso-pizarrosa.
2. Pizarras estefanienses.
3. Alternancia de pizarras y areniscas.
4. 5. y 6. Pórfidos
7. Alternancia de pizarras y areniscas.

En la figura nº22 se puede ver claramente la sucesión de materiales presentes en las brañas de Villablino.

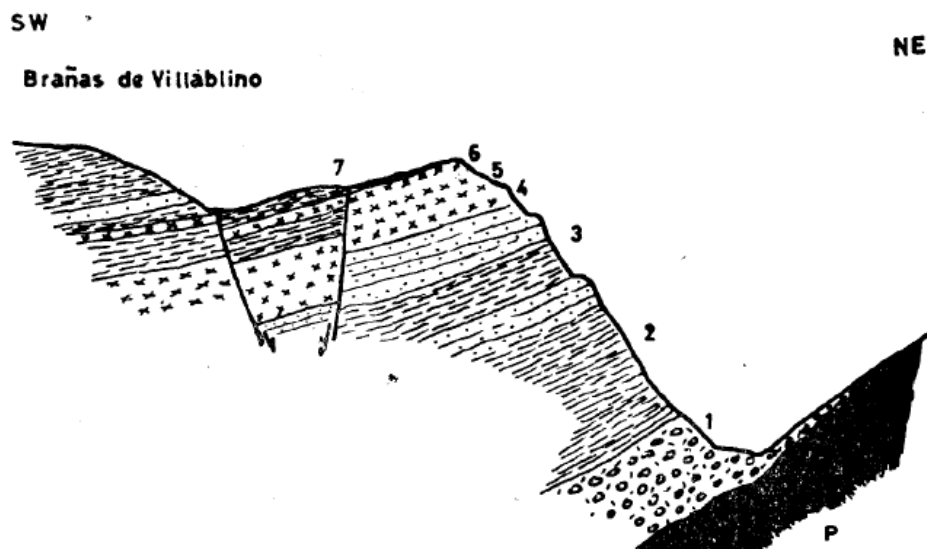


Figura nº22. Ciclotema de las Brañas de Villablino. Fuente: (Corrales, I. & Peláez 1966).

En la figura nº23 se puede observar el aspecto de las capas de arenisca de la secuencia Estefaniense, desde el 4º piso del grupo Feixolín (norte hacia la derecha), flanco norte del sinclinal.



Figura nº23. Aspecto de las capas de arenisca de la secuencia Estefaniense.

En la figura nº24 se muestra el afloramiento de las pizarras que dominan los ciclotemas del Estefaniense de la cuenca de Villablino y que se intercalan, con capas de carbón, entre las areniscas de la figura anterior. La fotografía está tomada desde la pista de acceso a la corta de Feixolín.



Figura nº24. Afloramiento de las pizarras que dominan los ciclotemas del Estefaniense.



### 3.2.2. GEOMORFOLOGIA

El relieve del Valle Laciana comprende fundamentalmente la zona del valle, propiamente dicho, y los picos que lo rodean, extendiéndose hacia el norte una mayor zona montañosa mientras que en dirección Norte-Sur se pueden encontrar diversos valles secundarios formados por afluentes del río Sil.

La geomorfología de la zona se ha formado a partir de la alteración de rocas calcáreas y silíceas consideradas como duras, como pueden ser las areniscas, cuarcitas y conglomerados, y de la alteración de las litologías silíceas consideradas como blandas, fundamentalmente las pizarras.

Esta alteración ha sido tanto de origen fluvial, como gravitacional y glaciar formando morrenas, circos glaciares o terrazas que reflejan los cambios del clima y del relieve que se dieron en épocas pasadas. Las dos zonas geomorfológicas con las que cuenta el valle suponen una diferencia clara en cuanto a flora, fauna y clima, siendo las condiciones ambientales muy distintas en las zonas bajas del valle y en los picos (E. Alonso 1995).

### 3.2.3. TECTÓNICA

Como se ha detallado en el apartado de estratigrafía, existen fundamentalmente tres tipos de materiales en la zona (Precámbrico, Cámbrico-Ordovícico y Carbonífero). El Precámbrico ha sufrido dos fases orogénicas diferentes y separadas en el tiempo (movimientos tectónicos que dan origen a las montañas), mientras que los materiales del Paleozoico (Cámbrico-Ordovícico y Carbonífero) han sufrido únicamente los efectos de la segunda orogenia.

Las dos etapas orogénicas presentes en la hoja son denominadas por (IGME 1982) como deformaciones antehercínicas y deformaciones hercínicas. Esta última es la responsable de las estructuras montañosas que se pueden observar actualmente superponiéndose a su predecesora. Se trata de un movimiento más intenso y que determinó la sedimentación de los materiales del Estefaniense y su posterior plegamiento hasta formar el sinclinal actual: es decir, la cuenca de Villablino es sinorogénica con la fase hercínica.

#### 3.2.3.1. *Deformaciones antehercínicas*

La principal muestra de la existencia de deformaciones antehercínicas es la discordancia angular que sufre la base del Cámbrico, la cual corrobora los plegamientos anteriores al depósito de estos materiales. Sin embargo, la dirección de los mismos es difícil de definir debido a deformaciones posteriores. Este tipo de pliegues pueden considerarse, en general, de gran radio, sin metamorfismo, ni esquistosidad (IGME 1982).



### **3.2.3.2. Deformaciones hercínicas**

Los materiales afectados por estas deformaciones son el Precámbrico y el Paleozoico, los cuales se pliegan conjuntamente. La orogenia actúa de forma distinta en la zona Asturoccidental-Leonesa (parte central y oeste de la hoja) y en la zona Cantábrica (parte noreste de la hoja), variando su intensidad y su estilo.

#### **Zona Asturoccidental-Leonesa**

Existen tres fases distintas de la orogenia hercínica en esta unidad. La primera fase da lugar a un plegamiento penetrativo vergente hacia el NE (actualmente se encuentra subvertical debido a las deformaciones posteriores). La segunda fase originó principalmente cabalgamientos de envergadura normalmente paralelos a las estructuras de la primera fase (NE). La superficie de cabalgamiento se dispone ahora subvertical debido a los efectos de la tercera fase. Esta última fase repliega las estructuras formadas en las fases antecesoras y modela el terreno hasta dejarlo en una disposición similar a la que se puede encontrar actualmente.

#### **Zona Cantábrica**

También en esta zona se pueden distinguir tres fases o etapas de plegamiento. En la primera de ellas, se producen una serie de cabalgamientos vergentes hacia el NE que provocan el deslizamiento de la cobertera paleozoica produciéndose escamas y cabalgamientos subsidiarios. Otro de los efectos de este mecanismo es la formación de anticlinales en las capas inclinadas y de sinclinales en zonas planas. En la segunda fase las deformaciones siguen teniendo la misma dirección que en la anterior, caracterizándose los pliegues por ser asimétricos y de magnitud variable, existiendo algunos de escasos metros y otros de escala kilométrica. Por último, la tercera fase formó un conjunto de pliegues transversales a la dirección de los encontrados en las anteriores disponiéndose perpendicularmente a los mismos.

#### **Evolución tectónica de la hoja**

Las tres fases ocurridas en la Zona Ssturoccidental-leonesa no se corresponden temporalmente con las tres fases identificadas en la Zona Cantábrica. La correlación entre ellas se puede ver en la tabla nº13.



| Zona tectónica          | Escala temporal |     |     |    |
|-------------------------|-----------------|-----|-----|----|
|                         | 1AL             | 2AL | 3AL |    |
| Asturoccidental-Leonesa |                 |     |     |    |
| Cantábrica              |                 | 1C  | 2C  | 3C |

Tabla nº13. Correlación temporal de la tectónica en el Valle Laciana.

Existen una serie de fracturas que se consideran post-hercínicas pero que tienen gran relevancia en la geología de la zona, ya que algunas de ellas influyen en la sedimentación del Estefaniense. La falla de Villablino es la que define la superficie de contacto entre el Precámbrico y el Estefaniense en la vertiente Sur del mismo. Esta falla es subvertical y cuenta con un salto de entre 1.500 y 2.000 metros (IGME 1982).

### 3.2.4. GEOTECNIA

Los estudios geotécnicos suelen representar estudios particularizados del terreno a escalas métricas, por lo tanto, para la valoración geotécnica de toda una comarca es necesaria la agrupación de los materiales de similares características presentes en la misma y tratarlos conjuntamente.

En (E. Alonso 1995) se identificaron hasta ocho conjuntos litológicos en la provincia de León susceptibles de ser agrupados y estudiados geotécnicamente. En la comarca de Laciana se pueden encontrar las Zonas 2, 4 y 6 correspondiendo respectivamente a los siguientes materiales:

- Zona 2: Materiales precámbricos.
- Zona 4: Cuarcitas, areniscas y pizarras del Ordovícico y Devónico.
- Zona 6: Lutitas, calizas, pizarras y niveles de carbón.

La zona 2 está compuesta fundamentalmente por materiales del Precámbrico destacando areniscas, pizarras y rocas volcánicas que forman un relieve accidentado y han sufrido una severa tectonización. Las características constructivas de estos materiales son buenas en general, aunque en zonas muy metamorfizadas y tectonizadas podrían darse asientos diferenciales. Las capacidades de carga de estos materiales son aceptables considerándose suficientes para soportar edificaciones y estructuras normales. El drenaje de los materiales es bueno considerándose impermeables exceptuando diaclasas puntuales.

La zona 4 está formada principalmente por cuarcitas, areniscas y pizarras del Ordovícico y Devónico. Destacan en su relieve algunos crestones cuarcíticos muy identificables en la zona



de actuación. Las características geomecánicas son buenas pudiendo existir zonas con alta meteorización que pudiera presentar un drenaje deficiente y una capacidad de carga reducida.

La zona 6 se compone de lutitas, calizas y areniscas intercaladas con niveles de carbón. Esta zona la constituye fundamentalmente el Estefaniense y es donde se encuentran las explotaciones mineras de la comarca. Los relieves son accidentados y pudieran originarse fenómenos de deslizamientos y soliflucción. La capacidad de carga de los terrenos es aceptable para estructuras normales, pero se deben tener muy presentes la existencia de galerías relacionadas con la minería. El drenaje es sensiblemente inferior al que se presenta en las zonas 2 y 4 existiendo un amplio drenaje subterráneo por tectonización y carstificación (E. Alonso 1995).

Los suelos que se pueden encontrar en el Valle Laciana pueden ser fundamentalmente de origen aluvial en las zonas cercanas a los ríos y zonas rocosas muy metamorfizadas. Las características geotécnicas de estos materiales son peores que los de las rocas y en general se recomienda buscar el estrato rocoso a la hora de construir cimentaciones.

Existen una serie de riesgos geológicos asociados a los suelos de la zona, entre los que destacan los deslizamientos y los desprendimientos. En el primer caso, se trata de movimientos a favor de una dirección de rotura cuando la resistencia del suelo se ve superada, mientras que los desprendimientos consisten en la caída de bloques individualizados (E. Alonso 1995).

### 3.3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

La red fluvial del Valle Laciana está formada por un cauce principal, correspondiente al del río Sil, que entra por el Este y llega hasta su zona central de la comarca, al Sur de Villablino, donde toma un giro hacia el Sur en el embalse de las Rozas.

A este cauce principal vierten diversos arroyos y regueros provenientes de los picos y los valles secundarios que se formaron en la segunda orogenia y que tienen una dirección general N-S.

El Valle de Laciana se encuentra en la Cuenca Hidrográfica del Miño-Sil y más en concreto en la subcuenca del Sil Superior, en su zona de cabecera (Vadillo, L., Aduvire, O., Alberruche, M.E., Arranz, J.C., Lacal, M., Martínez, B. & Moreno 2006). La subcuenca del Miño-Sil, en la provincia de León, ocupa un 22% de superficie contando con un total de 3.864,50 km<sup>2</sup> (Calabuig, L., Purroy, F. & Arribas 2004; B. Martínez 1995).

La Confederación Hidrográfica del Miño-Sil clasifica los ríos de su cuenca en seis categorías que se pueden consultar en la figura nº25. En esta misma figura se puede observar que los



ríos del Valle de Laciana (se señala con un punto rojo su capital, Villablino) tienen tipología de ríos de montaña y ríos de montaña calcárea.

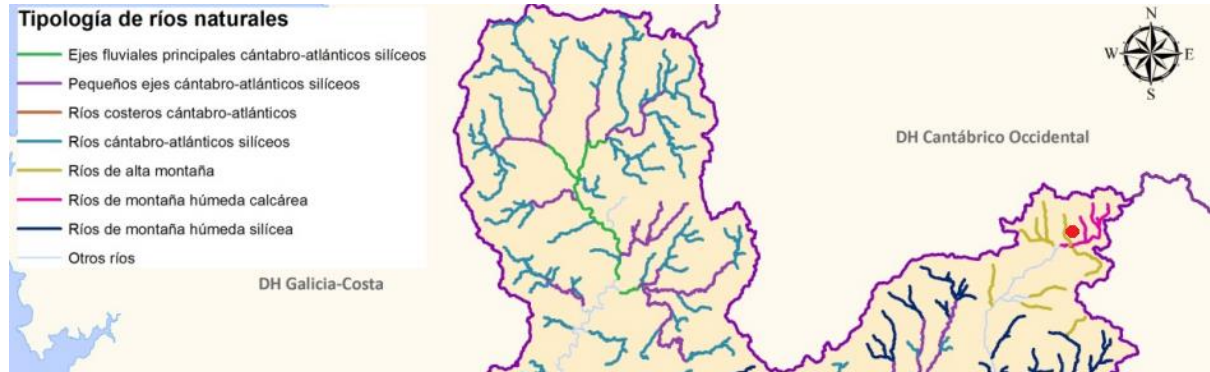


Figura nº 25. Tipología de las masas de agua superficiales naturales de la categoría río (CHM-S 2010)

Este tipo de ríos presentan un carácter torrencial debido a las cuantiosas precipitaciones que se producen en la zona y a los grandes desniveles que existen (B. Martínez 1995).

Los materiales geológicos del Valle de Laciana se pueden considerar predominantemente impermeables, aunque en las zonas calcáreas puede darse la acumulación de agua debida a la karstificación de las mismas y por las diaclasas o fracturas puntuales. La aparición de acuíferos puntuales también se da debido a la alternancia de materiales permeables e impermeables. Estos acuíferos no suelen tener un tamaño importante, pero son interesantes ya que su recarga está prácticamente garantizada gracias a las precipitaciones locales. Sin embargo, tienen una clara influencia estacional dependiendo en gran medida de la recarga exterior (Losa, A., Moreno, L. & Núñez 2010; IGME 1982).

### 3.4. SÍNTESIS MINERA

En este apartado se expone, de forma muy breve, y para contextualizar la vertiente de este trabajo más relacionada con la actividad minera, el devenir histórico de la minería en el Valle Laciana.

La gran expansión de la minería del carbón en el Valle Laciana y en el Bierzo fue posible gracias a construcción de la línea de ferrocarril entre Villablino y Ponferrada, promovida por la MSP en 1919, que supuso la apertura del carbón de los valles cercanos al río Sil al mercado nacional (Rubio, A., Trenas, J.A., Robles, J., Pardo, A. & Cortizo 2012). Tras una tímida y lenta implantación a partir de 1850, es después de la Guerra Civil, durante el periodo autárquico, cuando tienen lugar una etapa de bonanza para la minería en la comarca de Laciana y en el



Bierzo debido a valorización de los recursos mineros de la zona. La inversión en este sector quedó plasmada en la modernización de las explotaciones, la mecanización de la extracción -hasta el momento fundamentalmente manual- y la mejora del transporte (Rubio, A., Trenas, J.A., Robles, J., Pardo, A. & Cortizo 2012; Sanz 2018). Este significativo avance se puede observar en los datos de las tablas siguientes (15 y 16), donde se señalan, por cuencas, los incrementos en las producciones y las empresas implantadas.

| Producción de las cuencas leonesas en 1940 y 1960 |                  |            |                  |            |                  |              |
|---|------------------|------------|------------------|------------|------------------|--------------|
|   | 1940             |            | 1960             |            | Variación        |              |
|   | Toneladas        | %          | Toneladas        | %          | Absoluta         | %            |
| El Bierzo   | 621.874          | 33,45      | 1.505.959        | 42,02      | 884.085          | 142,16       |
| Villablino  | 634.236          | 34,12      | 1.005.236        | 28,05      | 371.000          | 58,5         |
| Ciñera-Matallana                                  | 204.988          | 11,03      | 536.684          | 14,97      | 331.696          | 161,81       |
| Sabero  | 322.588          | 17,35      | 353.999          | 9,88       | 31.411           | 9,74         |
| Valderrueda                                       | 58.829           | 3,16       | 96.488           | 2,69       | 37.659           | 64,01        |
| La Magdalena                                      | 13.340           | 0,72       | 73.852           | 2,06       | 60.512           | 453,61       |
| Cármenes-Vill.                                    | 3.256            | 0,18       | 11.786           | 0,33       | 8.530            | 261,98       |
| <b>TOTALES</b>                                    | <b>1.859.111</b> | <b>100</b> | <b>3.584.004</b> | <b>100</b> | <b>1.724.893</b> | <b>92,78</b> |

Tabla nº15. Producción de las cuencas leonesas en 1940 y 1960. Fuente: (Sánchez 2007).

| Empresas carboneras leonesas en 1940 y 1960 |                  |                  |                |                  |                |               |
|---|------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|---------------|
| Empresas                                    | Cuenca           | 1940             |                | 1960             |                | Variación     |
|   |                  | Toneladas        | %              | Toneladas        | %              | %             |
| MSP   | Villablino       | 537.875          | 28,93%         | 942.111          | 26,29%         | 75,15%        |
| Hulleras de Sabero                          | Sabero           | 219.533          | 11,81%         | 266.900          | 7,45%          | 21,58%        |
| Antracitas Gaiztarro                        | El Bierzo        | 137.368          | 7,39%          | 232.452          | 6,49%          | 69,22%        |
| Vasco-Leonesa                               | Ciñera-Matallana | 126.612          | 6,81%          | 504.161          | 14,07%         | 298,19%       |
| Victoriano González Vega                    | El Bierzo        | 47.376           | 2,55%          | 49.090           | 1,37%          | 3,62%         |
| Resto                                       |                  | 790.347          | 42,51%         | 1.589.290        | 44,34%         | 101,09%       |
| <b>TOTAL</b>                                |                  | <b>1.859.111</b> | <b>100,00%</b> | <b>3.584.004</b> | <b>100,00%</b> | <b>92,78%</b> |

Tabla nº16. Empresas carboneras leonesas en 1940 y 1960. Fuente: (Sánchez 2007).





Tras la aprobación del Plan de Estabilización Económica en 1959 la economía española se comienza a abrir a la economía mundial, fomentando su apertura. Este hecho supuso un gran cambio en el panorama energético español que tendió a utilizar energías limpias como el gas. Este cambio de política afectó en gran medida al sector carbonero y, por ende, a la minería del carbón. La recesión del sector también se vio incentivada por el mayor uso del petróleo como generador de energía primaria y secundaria debido a la estabilización de sus precios, mientras que el precio del carbón aumentó notoriamente por las mejoras salariales, lo que llevó a la quiebra de muchas empresas.

A partir de 1975, y bajo las directrices del Primer Plan Energético Nacional (PEN-75) se estimuló la producción y se favorece la minería a cielo abierto, que permite aumentar la capacidad de producción notoriamente. Las minas a cielo abierto más importantes en el Valle de Laciana fueron el Feixolín, Carrasconte, Nueva Julia y Fonfría. Con la incorporación de España a la Comunidad Europea (1985), y la consecuente adhesión del sector carbonero a la Comunidad Europea del Carbón y el Acero (CECA), el Gobierno comenzó a adaptar progresivamente tanto las ayudas destinadas a la minería del carbón como la fijación de precios de la materia prima, lo que supuso una transformación del sector minero nacional afectando negativamente al mismo, ya que la apertura de mercados ponía de manifiesto la poca competitividad del carbón nacional. El futuro incierto del sector y la situación de injusticia laboral de las empresas mineras hicieron reaccionar a los mineros que se movilizaron para evitar el cierre de las minas y la desaparición del pilar de la economía en sus territorios. Finalmente, en 1993, la MSP se declara en quiebra.

En 2010 el Ministerio de Industria, Energía y Turismo alcanzó un acuerdo preliminar con la Comisión Europea al respecto del cierre de las minas de carbón no competitivas (Sanz 2018). Este acuerdo preliminar se plasma en el Marco de Actuación 2013-2018 por el cual se programa el cierre de las minas de carbón poco competitivas y se favorece la reactivación de las comarcas mineras tanto económica como ambientalmente. El 11 de agosto de 2017, sentenciado el futuro de la minería del carbón en el Valle Laciana, cesó su actividad la mina La Escondida (Villablino), última explotación que permanecía abierta en la región (Sanz 2018).



### 3.5. CONTEXTO SOCIOECONÓMICO

El contexto socioeconómico de la comarca de Laciana ha sido profundamente determinado por la minería del carbón. La comarca de Laciana sufrió una enorme transformación en la primera mitad del S.XX pasando de ser una apacible tierra de ganaderos y agricultores a convertirse en una de las cuencas de carbón más productivas de España (Díez 1982). En los primeros años de la actividad extractiva los mineros locales no ocuparon todo su tiempo en la mina, sino que la tradición y lo bajos sueldos iniciales les empujaba a seguir manteniendo las labores ganaderas o agrícolas. Con el avance de la minería, este tipo de actividades quedaron relegadas a un segundo plano acabando por desaparecer (Roiz 1974).

En la tabla nº17 se puede observar la estructura sectorial de Villablino a lo largo del siglo XX:

| <b>Estructura sectorial de la población activa en Villablino (%)</b> |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Sector</b>  | <b>1887</b> | <b>1950</b> | <b>1991</b> | <b>2001</b> |
| Agricultura, ganadería y Silvicultura                                | 90,00       | 11,60       | 1,70        | 2,00        |
| Industria  | 3,00        | 72,00       | 63,80       | 39,70       |
| Minería  | -           | 69,00       | 50,60       | 36,00       |
| Otras actividades industriales                                       | -           | 3,00        | 13,20       | 3,70        |
| Construcción   | 4,00        | 1,00        | 6,20        | 8,40        |
| Servicios  | 3,00        | 15,40       | 28,20       | 49,90       |

Tabla nº17. Estructura sectorial de la población activa en Villablino. Fuente: (Vega 2003).

La llegada de las inversiones de la MSP al Valle supuso una revolución en la manera de subsistir en la comarca, dotando a la región de un esplendor económico que atrajo a un gran número de trabajadores (Ayuntamiento 2018). En la tabla nº18 se puede ver el desarrollo demográfico del municipio de Villablino a lo largo del siglo XX



| Población histórica Municipio Villablino |            |                                     |
|--|------------|-------------------------------------|
| Año                                      | Habitantes | %Variación sobre la década anterior |
| 1910                                     | 2.990      |                                     |
| 1920                                     | 4.991      | 66,92%                              |
| 1930                                     | 6.674      | 33,72%                              |
| 1940                                     | 7.641      | 14,49%                              |
| 1950                                     | 11.255     | 47,30%                              |
| 1960                                     | 15.529     | 37,97%                              |
| 1970                                     | 13.821     | -11,00%                             |
| 1981                                     | 14.256     | 3,15%                               |
| 1987                                     | 15.554     | 9,10%                               |
| 1989                                     | 15.993     | 2,82%                               |
| 1991                                     | 15.628     | -2,28%                              |
| 2001                                     | 13.789     | -11,77%                             |

Tabla nº18. Población histórica del Municipio de Villablino. Fuente: (Vega 2003).

La tendencia demográfica expresada hasta el momento en la comarca se truncó en las últimas décadas del siglo XX llegando a revertirse en la década de los 70 y sobre todo a partir de la década de los 90 y en el siglo XXI. Estos periodos de fuga de población coinciden con las crisis de la MSP, que se agudizó en los primeros años de los años 90. La mala situación laboral del sector y el eventual cierre de las minas del Valle de Laciana ha producido un éxodo demográfico tal y como demuestra la figura nº26:

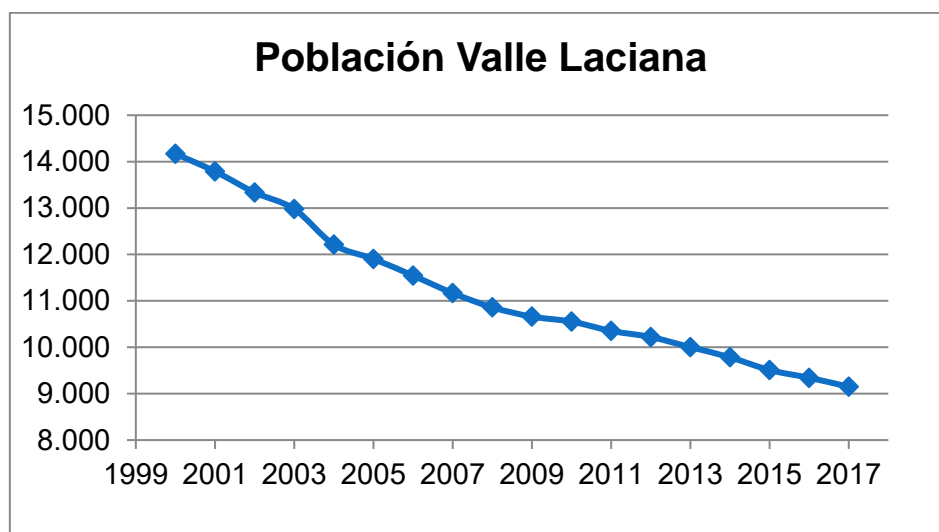


Figura nº26. Población del Valle Laciana en el siglo XXI. Fuente: Nomenclátor 2018.



La reducción de población ha afectado uniformemente a todos los núcleos de población pertenecientes a la comarca no existiendo grandes diferencias entre los efectos en los núcleos industriales y los núcleos rurales del municipio. En la tabla nº19 se puede ver la variación de población en todos los núcleos del Valle Laciana entre los años 2000 y el 2017:

| <b>Variación población (2000-2017)</b> |             |             |                  |
|--|-------------|-------------|------------------|
| <b>Unidad poblacional</b>              | <b>2000</b> | <b>2017</b> | <b>Variación</b> |
| 000000 VILLABLINO (MUNICIPIO)          | 14.169      | 9.150       | -35,42%          |
| 000100 CABOALLES DE ABAJO              | 1.740       | 1.064       | -38,85%          |
| 000200 CABOALLES DE ARRIBA             | 613         | 406         | -33,77%          |
| 000300 LUMAJO                          | 113         | 73          | -35,40%          |
| 000400 LLAMAS DE LACIANA               | 54          | 42          | -22,22%          |
| 000500 ORALLO                          | 332         | 194         | -41,57%          |
| 000600 RABANAL DE ABAJO                | 76          | 53          | -30,26%          |
| 000700 RABANAL DE ARRIBA               | 68          | 32          | -52,94%          |
| 000800 RIOSCURO                        | 236         | 123         | -47,88%          |
| 000900 ROBLES DE LACIANA               | 162         | 123         | -24,07%          |
| 001000 SOSAS DE LACIANA                | 183         | 158         | -13,66%          |
| 001100 VILLABLINO (POBLACIÓN)          | 7.703       | 5.190       | -32,62%          |
| 001200 VILLAGER DE LACIANA             | 715         | 502         | -29,79%          |
| 001300 VILLAR DE SANTIAGO (EL)         | 105         | 69          | -34,29%          |
| 001400 VILLASECA DE LACIANA            | 2.069       | 1.121       | -45,82%          |

Tabla nº19. Variación poblacional entre 2.000 y 2.017 en el Valle Laciana. Fuente: ("Nomenclátor" 2018).

La pérdida de población expuesta anteriormente está ligada a la pérdida de poder económico suponiendo la reducción de mercado potencial y se manifiesta cerrando actividades de suministro a la población (Rubio, A., Trenas, J.A., Robles, J., Pardo, A. & Cortizo 2012). (Berumen, S.A. & Llamazares 2014), vaticinaban una recesión aún mayor en estas regiones a partir del 1 de enero de 2019, con la eliminación de las subvenciones y las barreras comerciales al carbón, por parte de la Comisión Europea.



# CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE MINA



## 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE MINA DEL VALLE LACIANA

Este capítulo pretende reflejar todos los trabajos llevados a cabo para determinar las características del agua en distintos puntos de surgencia de agua de mina en el Valle Laciana, así como los resultados obtenidos en la investigación. Los trabajos llevados a cabo han sido los siguientes:

- Elaboración de una campaña de muestreo: se han seleccionado los lugares más representativos para determinar las características de las aguas de diversas minas en la comarca de Laciana. Dentro de este apartado se incluye la justificación y definición de los lugares seleccionados y de los ensayos a realizar.
- Toma de muestras en los puntos definidos en la campaña de muestreo siguiendo los protocolos oportunos para evitar la contaminación de las mismas.
- Desarrollo de los ensayos: se han realizado, tanto ensayos de campo, para obtener los parámetros fisicoquímicos relevantes de las muestras, como ensayos de laboratorio, para conocer la composición química de las mismas.
- Finalmente, se han elaborado tablas resumen para una mejor comprensión de los resultados.

El objetivo de la campaña es analizar el potencial de las aguas de mina del Valle Laciana como recurso energético. Con este fin, se han calculado los índices de Langelier y de Ryznar (Rafferty 2000) para cada una de las muestras analizadas, los cuáles definen la naturaleza de las aguas.

Con los resultados se llevarán a cabo, con posterioridad, una serie de análisis de alternativas para ver qué punto es el más beneficioso para instalar un sistema de aprovechamiento energético, los cuáles serán desarrollados en los capítulos V y VI.

### 4.1. METODOLOGÍA

En este apartado se desarrolla la metodología utilizada en la caracterización de las aguas de mina del Valle Laciana, desde el diseño de la red de muestreo hasta la metodología utilizada en la toma de muestras y ejecución de ensayos.



#### 4.1.1. Diseño de la red de muestreo

##### 4.1.1.1. Puntos de muestreo

En primer lugar, se han definido los puntos de muestreo donde se recogerían posteriormente las muestras de las aguas de mina. Como se ha comentado en apartados anteriores, el Valle Laciana ha sido intensamente explotado para la obtención de carbón desde principios del siglo XX. Este hecho hace que se hayan abierto cuantiosas instalaciones mineras en la comarca identificando un total de doce instalaciones entre minas de montaña, pozos mineros y minas a cielo abierto. La información sobre el número de instalaciones presentes en la comarca y sobre los distintos puntos de surgencia de agua de mina en el Valle ha sido proporcionada por José Luis Álvarez Menéndez, antiguo minero de la MSP que desarrolló su vida laboral entre los grupos mineros del Feixolín y de Calderón.

En la comarca de Laciana se pueden encontrar minas de tres tipos diferentes, minas de montaña, pozos mineros y minas a cielo abierto. En la tabla nº20 se pueden encontrar las explotaciones mineras presentes en el valle clasificadas según su tipología, y que ya fue presentada al inicio de esta tesis:

| Minas de montaña | Pozos mineros | Minas a cielo abierto |
|------------------|---------------|-----------------------|
| Paulina          | Pozo María    | Nueva Julia           |
| Calderón         |               | Fonfría               |
| Peñas Bolsada    |               | Carrasconte           |
| Lumajo           | Pozo Calderón | Feixolín              |
| Carrasconte      |               |                       |
| Feixolín         |               |                       |

Tabla nº20. Instalaciones existentes en el Valle Laciana.

Los puntos de muestreo seleccionados recogen las aguas de la mayoría de las minas de montaña y pozos mineros mencionados anteriormente con el fin de estudiar las propiedades de las mismas e identificar cuál o cuáles de ellas serían susceptibles de ser utilizadas en un aprovechamiento energético.

En la figura nº27 se recoge la localización de cada uno de los puntos estudiados con la localidad de Villablino y el embalse de las Rozas en la parte inferior central de la figura:

1. Mina de montaña del Grupo Calderón
2. Mina de montaña de Lumajo



3. Mina de montaña de Carrasconte
4. Transformadores de Calderón (recoge agua de la mina de montaña de Calderón)
5. Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de abajo)
6. Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de arriba)
7. Mina de montaña de Paulina
8. Pozo María
9. Transversal de Villablino (recoge aguas del Grupo Calderón y del Feixolín).



Figura nº27. Localización de puntos de muestreo.

En el anexo 2 se muestran una serie de fichas donde se recoge la información principal de cada uno de los puntos de muestreo. Los datos de geolocalización de los puntos de muestreo, así como la altitud de los mismos, se han obtenido de Google Earth.





## 4.1.2. Toma de muestras

### 4.1.2.1. Evolución cronológica

La toma de muestras se ha llevado a cabo durante todo un año hidrológico con el fin de estudiar las variaciones estacionales de los parámetros de las aguas de mina. Las muestras fueron recolectadas los siguientes días:

- 13 de abril de 2017 (primavera de 2017)
- 22 de julio de 2017 (verano de 2017)
- 1 de noviembre de 2017 (otoño de 2017)
- 30 de diciembre de 2017 (invierno de 2017)
- 22 de abril de 2018 (primavera de 2018)

Como se puede observar en el listado anterior, se hicieron ensayos de contraste en la primavera de 2018 para observar si los datos obtenidos eran consistentes de un año para otro. De esta manera, se realizó la campaña de muestreo durante el año 2017 quedando concluida en primavera de 2018. En la figura nº28 se puede observar la toma de la temperatura del agua que brota de la mina de montaña de Bolsada (Caboalles de Arriba).



Figura nº28. Medición de temperatura de las aguas de mina del punto de muestreo 6.



#### 4.1.2.2. *Parámetros medidos*

La medición de parámetros (realizada por el autor) se puede dividir en dos grupos, los que fueron tomados en campo y los que fueron determinados en laboratorio.

La temperatura y el pH fueron medidos en campo ya que el pH se corrige con la temperatura, por lo tanto, para conocer el pH que realmente tiene el agua dentro de la mina es preciso medirlo en las condiciones de temperatura de la descarga.

El resto de los parámetros se midieron en el laboratorio, a partir de las muestras tomadas en campo. Los parámetros evaluados en laboratorio fueron los siguientes:

- Conductividad
- Dureza
- Alcalinidad
- Turbidez

La justificación de la utilidad de la medición de estos parámetros para el aprovechamiento energético de las aguas de mina del Valle Laciana es la siguiente:

- Temperatura(°C): este parámetro es fundamental para la viabilidad técnica del aprovechamiento energético. Cuanta más temperatura tenga el agua a utilizar, mayor podrá ser el intercambio térmico y mayor eficiencia tendrá el sistema (Ochsner 2008).
- pH: Necesario para obtener los índices de Langelier y de Ryznar que sirven para conocer la naturaleza de las aguas (corrosiva o incrustante) en conducciones industriales (Rafferty 2000).
- Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): A partir de la conductividad se hace una estimación de los Sólidos Totales Disueltos (TDS), necesario para calcular los índices de Langelier y de Ryznar (Rafferty 2000).
- Dureza (gH): Necesario para obtener los índices de Langelier y de Ryznar (Rafferty 2000).
- Alcalinidad (kH): Necesario para obtener los índices de Langelier y de Ryznar (Rafferty 2000).
- Turbidez (NTU's): Es un parámetro que mide la claridad del agua y que sirve para conocer la calidad de la misma (Bouvier, M.E., Pérez, A. & Muniz 2013).

Además de los ensayos de laboratorio anteriormente mencionados y que fueron ejecutados directamente por el autor de la presente tesis, se recogieron muestras para ser enviadas a laboratorios especializados a través de la Universidad de Oviedo donde se obtuvo la concentración de cationes y aniones presentes en cada una de las muestras.



#### 4.1.2.3. *Protocolo de muestreo*

La metodología utilizada para la toma de muestras ha sido la dictada por la universidad de Oviedo en su protocolo de muestreo de aguas, actualizado en octubre de 2017.

Los materiales utilizados durante el muestreo han sido los siguientes:

- Botes de vidrio de borosilicato de 60 ml.
- Pipetas desechables.
- Ácido nítrico diluido (68%).
- Guantes desechables.
- Botellas de plástico.
- Nevera portátil para almacenamiento de botes.
- Pipetas.

Antes de comenzar la toma de muestras, todos los botes de vidrio han sido lavados con detergente no tensoactivo de laboratorio y enjuagado tres veces para asegurar la total remoción del mismo y evitar así la contaminación de las muestras. Posteriormente los botes fueron sumergidos en cubetas con solución 10% volumen/volumen de ácido nítrico 24 horas, enjuagado tres veces con agua Mili-Q 1 y secado en la campana de aspiración. Por último, el material fue almacenado en bolsas de plástico y suministrado al doctorando en el correspondiente recipiente térmico. La limpieza previa de los materiales fue llevada a cabo por el personal de laboratorio de la Universidad de Oviedo.

Durante el muestreo el doctorando llevó a cabo todas las indicaciones y recomendaciones recogidas en el protocolo de muestreo de la Universidad de Oviedo, las cuales se detallan a continuación:

1. Se enjuagaron tres veces los botes de vidrio con el agua del punto de muestreo correspondiente para la correcta homogeneización del recipiente.
2. Tras el enjuague se rellenó completamente el bote con la muestra de agua evitando que quedara aire por encima del agua recogida.
3. Se le añadieron un total de 6 gotas de la solución de ácido nítrico al 68% utilizando la pipeta. De esta manera se evita la precipitación de metales disueltos.
4. Posteriormente, se cerró el bote y se agitó con fuerza para conseguir la completa homogeneización de la muestra.
5. Por último, se almacenó la muestra en una nevera portátil durante su transporte hasta nevera y posterior entrega al personal de laboratorio de la Universidad de Oviedo.



Este protocolo se siguió para cada una de las muestras tomadas, quedando las mismas etiquetadas con el código del punto de muestreo y la fecha en las que se recogieron. En las figuras nº29 y nº30 se puede observar el material utilizado en la campaña de muestreo incluyendo el recipiente térmico, los botes de vidrio donde se recogían las muestras y el instrumento utilizado para medir la temperatura y el pH.



Figura nº29. Material utilizado en la toma de muestras.



Figura nº30. Botes de muestras en nevera.



#### 4.1.2.4. Equipos utilizados

Para la medición de los parámetros mencionados en apartados anteriores se ha utilizado instrumentación específica, la cual es detallada a continuación:

- pH y Temperatura: Para la medición de estos parámetros se ha utilizado un medidor de pH de HANNA modelo HI 9024C. Este instrumento es resistente al agua y está diseñado para usos industriales bajo condiciones agresivas. Cuenta con un microprocesador y con una pantalla LCD que muestra el pH y la temperatura al mismo tiempo. En la figura nº31 se muestra el medidor de pH en una prueba de medición en laboratorio.

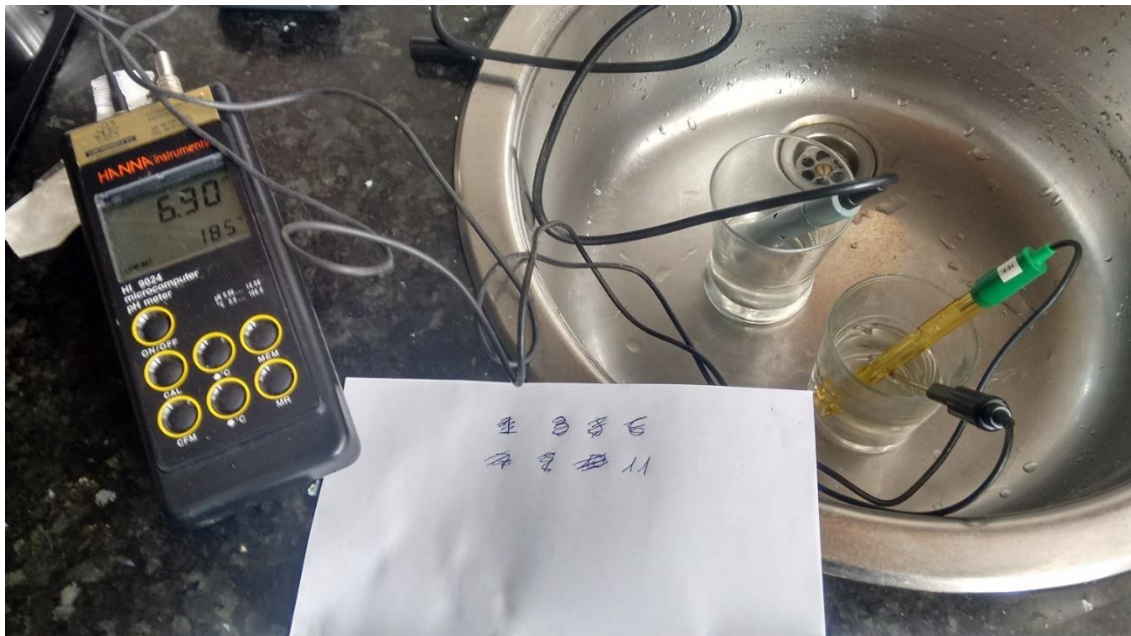


Figura nº31. Prueba de medición de pH y Temperatura en laboratorio.

- La turbidez ha sido medida con un medidor de turbidez, también de la marca HANNA, en concreto el modelo HI 93703. Se trata de un medidor de alta exactitud, diseñado para determinar la turbidez del agua y las aguas residuales, tanto en el campo como en el laboratorio. Su rango oscila desde los 0 hasta 1000 NTUs y se presenta en dos escalas, una de 0 a 50 NTUs y otra de 50 a 1000 NTUs. El diseño del instrumento cumple con las normativas internacionales ISO 7027, EN 50081-1 y EN 50082-1, que garantizan bajos valores de emisión electromagnética y precisión en las medidas bajo campos electromagnéticos. El funcionamiento del medidor se basa en iluminar la cubeta y recoger los correspondientes destellos de luz. En primer lugar, la fuente de luz, en este caso un diodo LED de infrarrojos con una longitud de onda de 890 nm, emite la luz hacia la cubeta. La luz es desviada por las partículas no disueltas en el



líquido de la cubeta y un sensor, posicionado a 90° con respecto a la dirección de la fuente de luz, detecta la cantidad de haces de luz que han sido desviadas en ángulo recto por las mismas. Por último, el microprocesador convierte la medida en valores de NTU (Nephelometric Turbidity Unit). En la figura nº32 se puede ver el medidor de turbidez.



Figura nº32. Medidor de turbidez HI93703.

- La conductividad ha sido medida con otro instrumento de HANNA (HI 9033). Este instrumento utiliza la tecnología potenciométrica de cuatro anillos, la cual ofrece mayor precisión que el método amperimétrico común. Tiene un rango de 0 a 199,9 S/cm, lo que permite que pueda ser usado para analizar cualquier tipo de muestra de agua, desde agua desionizada hasta salmuera. En la figura nº33 se puede ver el medidor de conductividad mientras se hacía la medición de una muestra.



Figura nº33. Medida de conductividad.

- La dureza y la alcalinidad se han medido mediante las pruebas de dureza total JBL GH y de dureza de carbonatos JBL KH, respectivamente. En ambos casos se ha enjuagado primero el vaso graduado para evitar contaminaciones. Posteriormente, se ha llenado el vaso graduado hasta la marca de 5 ml con el agua de la muestra. A continuación, se añadió gota a gota el reactivo de la prueba y se agitó cada vez que se añadía una gota, realizando un conteo de las mismas. Po último, cuando la coloración de la solución cambia se apuntó el número de gotas administradas ya que una gota de reactivo disuelto equivale a una dureza total de un grado alemán, en el caso de la prueba de dureza total, y a una dureza de carbonatos de un grado alemán, en el caso de la prueba de dureza de carbonatos. En la figura nº34 se puede ver el tes de dureza utilizado.



Figura nº34. Test de dureza total JBL.



## 4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

En este apartado se recogen los resultados obtenidos en la campaña de muestreo y los resultados de análisis de cationes de las aguas de mina del Valle Laciaa.

### 4.2.1. Resultados de la campaña de muestreo

Los resultados obtenidos en la campaña de muestreo se van a presentar en tablas y gráficos para facilitar su comprensión.

En primer lugar, se van a presentar los resultados por parámetro para observar la variación de los mismos en los distintos puntos de muestreo y durante todo el año hidrológico.

Posteriormente, se presentará una tabla global donde se recogerán los resultados de cada punto de muestreo a lo largo de todo el año hidrológico y se presentará una media de los valores de los parámetros, que será la utilizada más adelante en los cálculos y en el análisis de alternativas.

#### 4.2.1.1. Resultados por parámetro

A continuación, se presentan las tablas y gráficos de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados en la campaña de muestreo. En la tabla nº22 y en la figura nº35 se muestran los resultados de la medición de temperatura en las muestras analizadas.





| Temperatura (°C)            | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón       | 14,1       | 15,2       | 15,1       | 13,6       | 13,7       |
| Mina montaña Lumajo         | 12,5       | 12,9       | 13,1       | 13,1       | 12,0       |
| Mina montaña Carrasconte    | 12,5       | 12,7       | 12,5       | 12,3       | 12,4       |
| Calderón transformadores    | 14,3       | 15,5       | 15,3       | 13,5       | 13,8       |
| Bolsada Caboalles de abajo  | 12,3       | 12,4       | 12,3       | 11,9       | 12,2       |
| Bolsada Caboalles de arriba | 9,8        | 9,8        | 10,0       | 10,2       | 9,1        |
| Mina Montaña Paulina        | 10,6       | 10,3       | 9,6        | 8,7        | 10,4       |
| Senda verde María           | 14,0       | 14,1       | 13,7       | 13,7       | 13,4       |
| Transversal Villablino      | 14,5       | 14,6       | 14,7       | 14,7       | 13,9       |

Tabla nº22. Resultados de temperaturas.

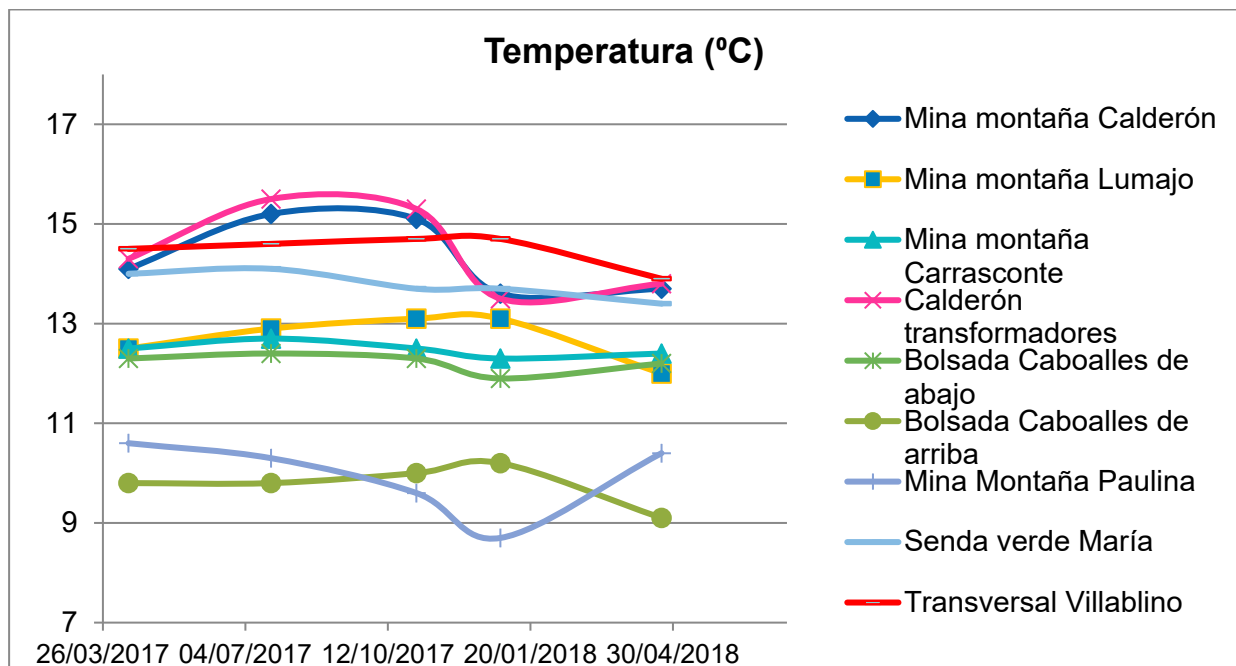


Figura nº35. Evolución de las temperaturas.

La mayoría de los puntos de muestreo estudiados presentan pequeñas variaciones en la temperatura de sus aguas a lo largo del año, siendo generalmente más altas en verano que en invierno (diferencia aproximada de 2°C). No obstante, existen diferencias significativas entre las temperaturas de unos sitios a otros. Las temperaturas más bajas registradas se han dado en la mina de montaña de Paulina, llegándose en invierno hasta los 8,7°C, mientras que la temperatura más alta registrada se dio en verano en Calderón transformadores (15,5°C). También se han registrado temperaturas altas en la mina de montaña de Calderón (15,2°C), en las aguas del pozo María (14,1°C) y en el Transversal de Villablino (14,7°C).



| pH                          | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón       | 7,10       | 6,73       | 7,55       | 7,38       | 6,89       |
| Mina montaña Lumajo         | 6,98       | 6,67       | 7,17       | 7,33       | 6,86       |
| Mina montaña Carrasconte    | 6,45       | 6,50       | 6,71       | 6,71       | 6,47       |
| Calderón transformadores    | 7,03       | 6,87       | 7,08       | 7,17       | 7,08       |
| Bolsada Caboalles de abajo  | 6,81       | 6,65       | 7,05       | 6,86       | 6,88       |
| Bolsada Caboalles de arriba | 7,13       | 6,85       | 7,23       | 7,00       | 6,98       |
| Mina Montaña Paulina        | 6,59       | 6,36       | 6,61       | 6,86       | 6,80       |
| Senda verde María           | 6,90       | 6,61       | 6,81       | 6,89       | 7,02       |
| Transversal Villablino      | 6,71       | 6,50       | 7,29       | 7,30       | 6,79       |

Tabla nº23. Resultados de pH.

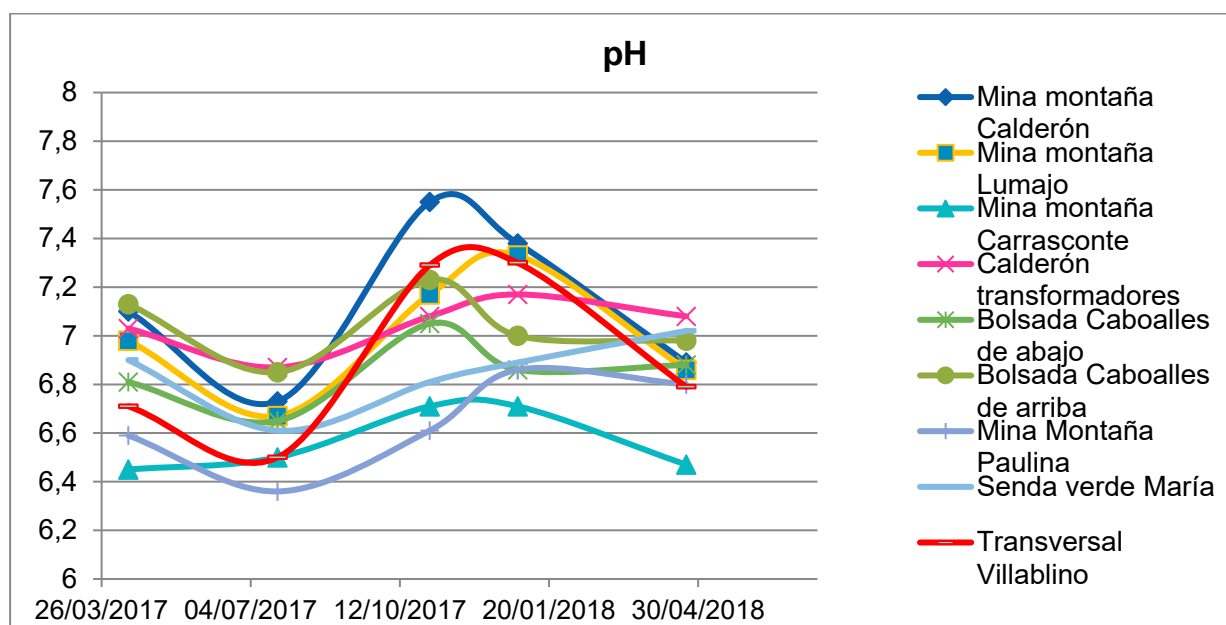


Figura nº36. Evolución del pH.

En la tabla nº23 y en la figura nº36 se observa que la totalidad de las aguas analizadas pueden ser consideradas como aguas neutras ya que su pH se encuentra entre 6,36 y 7,55. Existe una ligera variación del pH entre verano e invierno siendo menor en invierno, existiendo en algunos casos una diferencia de más de 0,5 puntos relativos de pH (Transversal Villablino y Mina de montaña de Calderón).



| Turbidez (NTU)              | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón       | 1,03       | 2,29       | 1,61       | 0,65       | 2,85       |
| Mina montaña Lumajo         | 15,85      | 14,22      | 5,00       | 6,82       | 18,56      |
| Mina montaña Carrasconte    | 83,00      | 47,51      | 64,00      | 13,40      | 3,17       |
| Calderón transformadores    | 10,79      | 10,48      | 16,92      | 5,57       | 5,15       |
| Bolsada Caboalles de abajo  | 6,92       | 5,83       | 2,16       | 8,46       | 1,56       |
| Bolsada Caboalles de arriba | 0,48       | 30,53      | 2,33       | 7,48       | 2,00       |
| Mina Montaña Paulina        | 19,17      | 6,21       | 0,50       | 21,73      | 12,02      |
| Senda verde María           | 8,89       | 12,68      | 12,01      | 8,69       | 17,09      |
| Transversal Villablino      | 2,11       | 1,32       | 0,14       | 0,05       | 1,95       |

Tabla nº24. Resultados de turbidez.

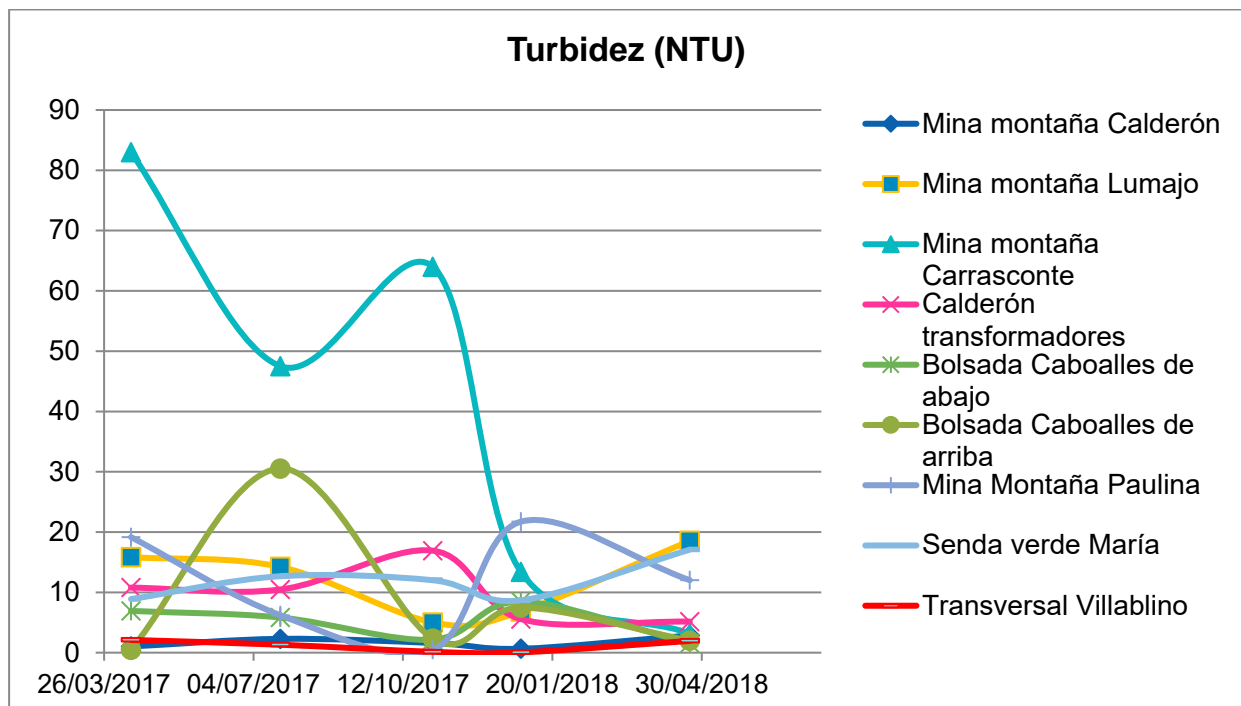


Figura nº37. Evolución de la turbidez.

En la tabla nº24 y la figura nº37 se muestra que los valores de la turbidez en las aguas analizadas varían en gran medida de unos puntos de muestreo a otros y dependiendo de la época del año en la que se tomen las muestras. El agua con mayor turbidez se encuentra en la mina de montaña de Carrasconte alcanzando valores de 83 NTU. Las aguas menos turbias y cuyo valor a permanecido más constante a lo largo del año han sido las de la mina de la mina de montaña de Calderón y las del Transversal Villablino. Los valores máximos en los puntos de muestreo antes citado son (2,85 y 2,11 respectivamente).



| Conductividad ( $\mu$ Siemens) | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón          | 1343       | 1602       | 1281       | 1349       | 1789       |
| Mina montaña Lumajo            | 649        | 540        | 408        | 515        | 742        |
| Mina montaña Carrasconte       | 184        | 1767       | 1358       | 1690       | 2070       |
| Calderón transformadores       | 1541       | 2340       | 2070       | 1787       | 1878       |
| Bolsada Caboalles de abajo     | 923        | 1123       | 828        | 1306       | 1264       |
| Bolsada Caboalles de arriba    | 233        | 397        | 312        | 182        | 217        |
| Mina Montaña Paulina           | 527        | 458        | 365        | 247        | 550        |
| Senda verde María              | 806        | 1000       | 762        | 992        | 946        |
| Transversal Villablino         | 765        | 878        | 703        | 845        | 894        |

Tabla n°25. Resultados de las medidas de conductividad.

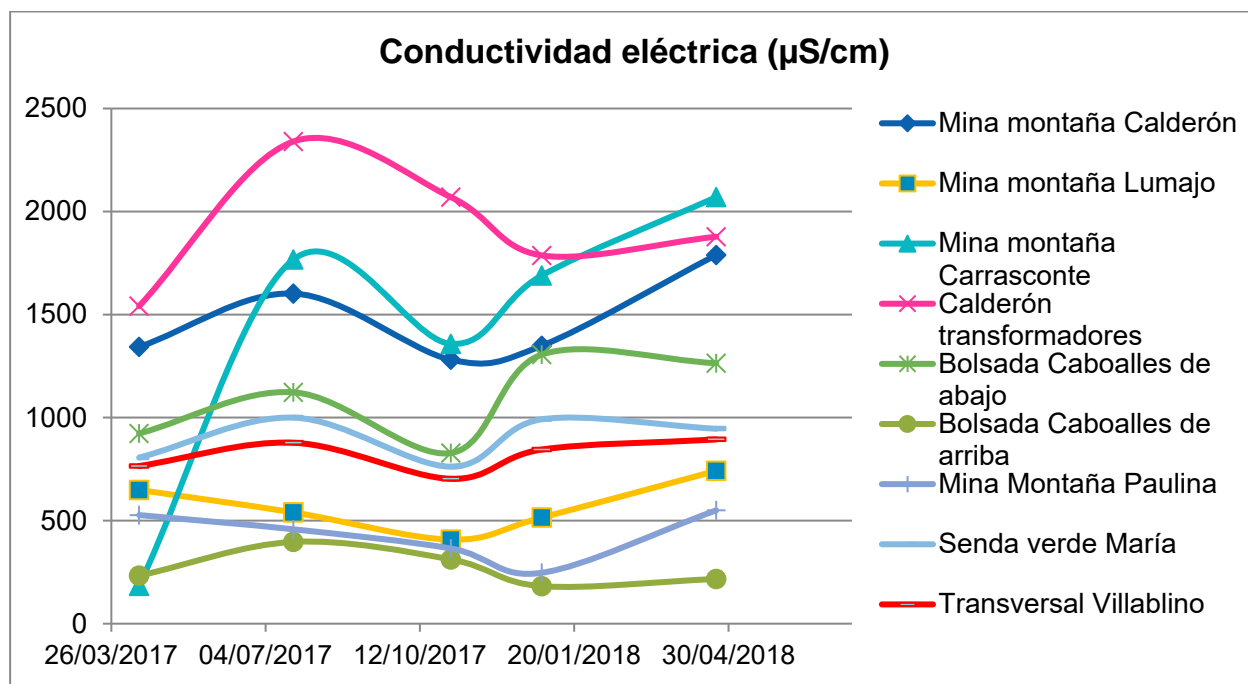


Figura n°38. Evolución de la conductividad eléctrica.

En la tabla n°25 y la figura n°38 se puede ver que la conductividad eléctrica es razonablemente estable a lo largo del año. Existe un valor que no está en consonancia con los resultados obtenidos el resto del año, se trata del valor tomado el 26 de marzo de 2017 en la mina de montaña de Carrasconte. Este valor corresponde a 184  $\mu$ S/cm mientras que en el mismo periodo en el año 2018 es de 2.070. Una variación tan acusada puede explicarse únicamente por un error en la medición tomada en primavera de 2017. La conductividad es alta en los drenajes del Grupo Calderón (en torno a los 2.000  $\mu$ S/cm) mientras que la conductividad más



baja se registra en la mina de montaña de Bolsada, en Caboalles de Arriba (en torno a los 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

| Dureza (grado gH)           | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón       | 47         | 47         | 41         | 50         | 62         |
| Mina montaña Lumajo         | 26         | 16         | 15         | 13         | 19         |
| Mina montaña Carrasconte    | 63         | 48         | 60         | 51         | 72         |
| Calderón transformadores    | 48         | 56         | 67         | 44         | 55         |
| Bolsada Caboalles de abajo  | 30         | 30         | 34         | 38         | 42         |
| Bolsada Caboalles de arriba | 14         | 13         | 15         | 6          | 5          |
| Mina Montaña Paulina        | 17         | 13         | 18         | 8          | 16         |
| Senda verde María           | 24         | 27         | 26         | 26         | 30         |
| Transversal Villablino      | 21         | 22         | 25         | 26         | 27         |

Tabla nº26. Resultados de las medidas de dureza.

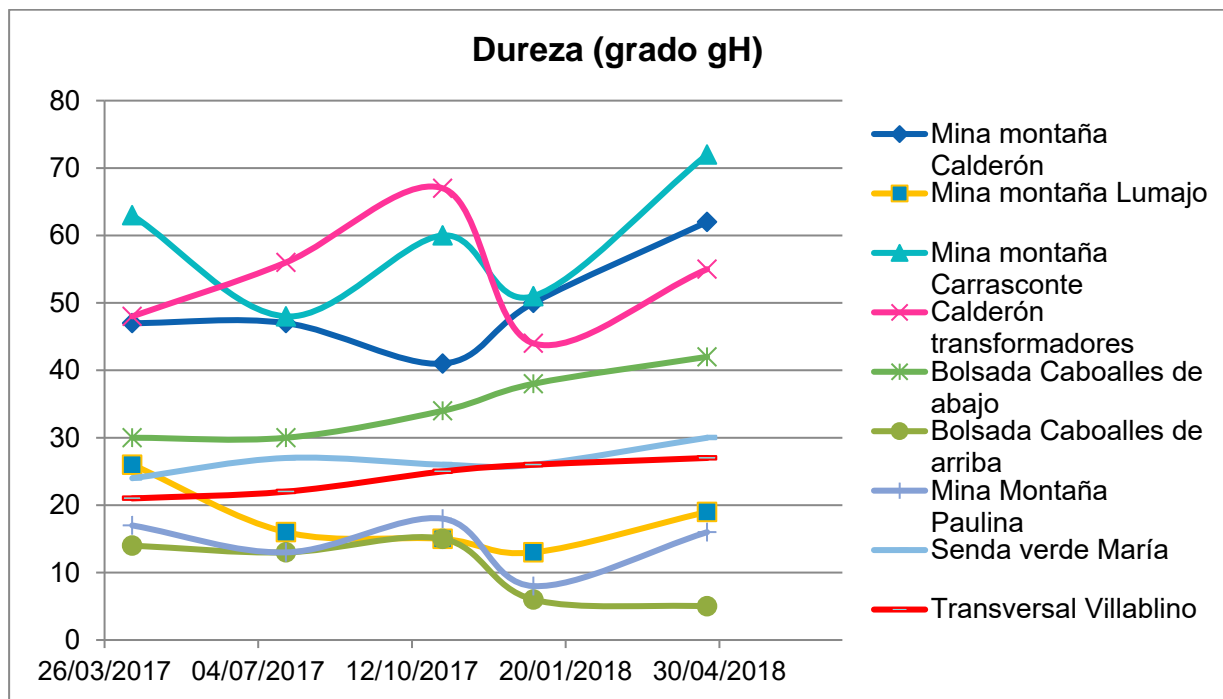


Figura nº39. Evolución de la dureza.

De la tabla nº26 y la figura nº39 se extrae que la dureza total va en consonancia con la conductividad. Los valores más altos se encuentran en el grupo Calderón y en la mina de montaña de Carrasconte, mientras que los valores más bajos se encuentran en la mina de montaña de Bolsada, Caboalles de Arriba. Los primeros suelen estar por encima de 50 grados alemanes, e incluso llegando a estar por encima de 70 grados alemanes (caso de Carrasconte



en el invierno de 2018), mientras que, en Bolsada, Caboalles de Arriba, se encuentran unos valores del entorno de 10 grados alemanes.

| Alcalinidad (grado gH)      | 13/04/2017 | 22/07/2017 | 01/11/2017 | 30/12/2017 | 22/04/2018 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mina montaña Calderón       | 15         | 14         | 15         | 17         | 24         |
| Mina montaña Lumajo         | 15         | 12         | 9          | 11         | 15         |
| Mina montaña Carrasconte    | 28         | 25         | 27         | 26         | 27         |
| Calderón transformadores    | 21         | 23         | 25         | 21         | 24         |
| Bolsada Caboalles de abajo  | 14         | 14         | 12         | 15         | 13         |
| Bolsada Caboalles de arriba | 6          | 4          | 6          | 3          | 5          |
| Mina Montaña Paulina        | 12         | 7          | 9          | 6          | 14         |
| Senda verde María           | 21         | 20         | 23         | 24         | 18         |
| Transversal Villablino      | 14         | 16         | 17         | 24         | 19         |

Tabla nº27. Resultados de las determinaciones de alcalinidad.

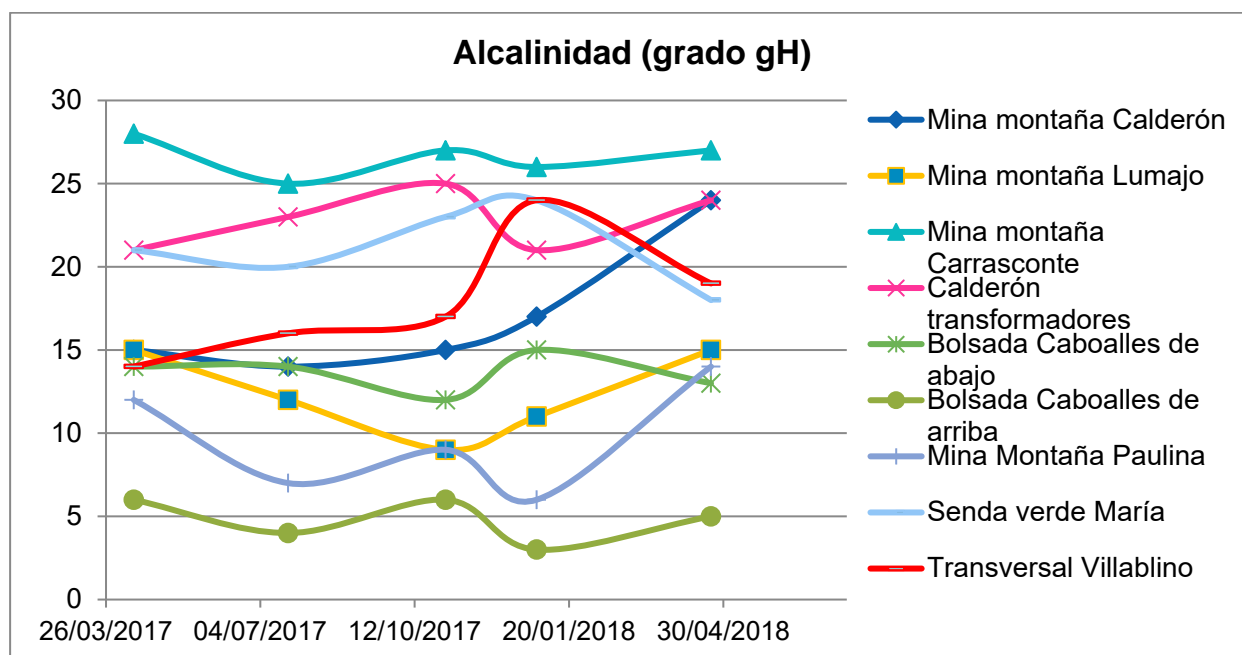


Figura nº40. Evolución de la alcalinidad.

La tabla nº27 y la figura nº40 muestran que la tendencia de la conductividad y de la dureza total se repite en la alcalinidad, si bien, se encuentran valores altos también en las aguas del Pozo María y en el Transversal Villablino. La mayoría de las aguas estudiadas presentan una alcalinidad menor a las aguas de mina que se presentan en otras zonas del norte de España (Asturias) (Loredo, C., Ordóñez, A., Garcia-Ordiales, E., Álvarez, R., Roqueñi, N., Cienfuegos,



P., Peña, A. & Burnside 2017). Las aguas menos duras son nuevamente las de la mina de montaña de Bolsada en Caboalles de Arriba.

#### 4.2.1.2. Resultados por puntos de muestreo

Los resultados recogidos en la tabla nº28 se han mostrado previamente en (Matas, A., García-Carro, F. & Loredo 2018a) y (Matas, A., García-Carro, F. & Loredo 2018b). Estos dos trabajos han sido presentados, respectivamente, en el Tercer Congreso Internacional sobre Avances en la Investigación en Energías Limpias (ICACER 2018) celebrado en Barcelona en 2018 y en el Sexto Congreso Internacional sobre la Gestión de Residuos Industriales y Peligrosos, celebrado en Creta en 2018.

Tanto la dureza como la alcalinidad y el TDS se presenta en las unidades necesarias para ser introducidas en las fórmulas del índice de Langelier y de Ryznar (Rafferty 2000).

Los factores de conversión utilizados han sido los siguientes (JBL, n.d.):

Dureza total → mg/l CaCO<sub>3</sub> = 17,8 \*grados alemanes

Alcalinidad → ppm CaCO<sub>3</sub> = 21,8 \*grados alemanes

|   | pH  | T (°C) | Turbidez (NTU) | Conductividad eléctrica (µS/cm) | Dureza (mg/l CaCO <sub>3</sub> ) | Alcalinidad (ppm CaCO <sub>3</sub> ) | TDS (ppm CaCO <sub>3</sub> ) |
|---|-----|--------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| <b>Mina de montaña del Grupo Calderón</b> |     |        |                |                                 |                                  |                                      |                              |
| abr-17                                    | 7,1 | 14,1   | 1,0            | 1343,0                          | 836,6                            | 327,0                                | 1163,6                       |
| jul-17                                    | 6,7 | 15,2   | 2,3            | 1602,0                          | 836,6                            | 305,2                                | 1141,8                       |
| nov-17                                    | 7,6 | 15,1   | 1,6            | 1281,0                          | 729,8                            | 327,0                                | 1056,8                       |
| dic-17                                    | 7,4 | 13,1   | 0,7            | 1349,0                          | 890,0                            | 370,6                                | 1260,6                       |
| abr-18                                    | 6,9 | 13,7   | 2,9            | 1789,0                          | 1103,6                           | 523,2                                | 1626,8                       |
| Media                                     | 7,2 | 14,4   | 1,4            | 1393,8                          | 823,3                            | 332,5                                | 1155,7                       |
| <b>Mina de montaña de Lumajo</b>          |     |        |                |                                 |                                  |                                      |                              |
| abr-17                                    | 7,0 | 12,5   | 15,9           | 649,0                           | 462,8                            | 327,0                                | 789,8                        |
| jul-17                                    | 6,7 | 12,9   | 14,2           | 540,0                           | 284,8                            | 261,6                                | 546,4                        |
| nov-17                                    | 7,2 | 13,1   | 5,0            | 408,0                           | 267,0                            | 196,2                                | 463,2                        |
| dic-17                                    | 7,3 | 13,1   | 6,8            | 515,0                           | 231,4                            | 239,8                                | 471,2                        |
| abr-18                                    | 6,9 | 12,0   | 18,6           | 742,0                           | 338,2                            | 327,0                                | 665,2                        |
| Media                                     | 7,0 | 12,9   | 10,5           | 528,0                           | 311,5                            | 256,2                                | 567,7                        |



| <b>Mina de montaña Carrasconte</b>                |     |      |      |        |        |       |        |
|---|-----|------|------|--------|--------|-------|--------|
| abr-17  | 6,5 | 12,5 | 83,0 | 1840,0 | 1121,4 | 610,4 | 1731,8 |
| jul-17  | 6,5 | 12,7 | 47,5 | 1767,0 | 854,4  | 545,0 | 1399,4 |
| nov-17  | 6,7 | 12,5 | 64,0 | 1358,0 | 1068,0 | 588,6 | 1656,6 |
| dic-17  | 6,7 | 12,3 | 13,4 | 1690,0 | 907,8  | 566,8 | 1474,6 |
| abr-18  | 6,5 | 12,4 | 3,2  | 2070,0 | 1281,6 | 588,6 | 1870,2 |
| Media   | 6,6 | 12,5 | 52,0 | 1663,8 | 987,9  | 577,7 | 1565,6 |
| <b>Calderón transformadores</b>                   |     |      |      |        |        |       |        |
| abr-17  | 7,0 | 14,3 | 10,8 | 1541,0 | 854,4  | 457,8 | 1312,2 |
| jul-17  | 6,9 | 15,5 | 10,5 | 2340,0 | 996,8  | 501,4 | 1498,2 |
| nov-17  | 7,1 | 15,3 | 16,9 | 2070,0 | 1192,6 | 545,0 | 1737,6 |
| dic-17  | 7,2 | 13,5 | 5,6  | 1787,0 | 783,2  | 457,8 | 1241,0 |
| abr-18  | 7,1 | 13,8 | 5,2  | 1878,0 | 979,0  | 523,2 | 1502,2 |
| Media   | 7,0 | 14,7 | 10,9 | 1934,5 | 956,8  | 490,5 | 1447,3 |
| <b>Mina de montaña Bolsada Caballes de Abajo</b>  |     |      |      |        |        |       |        |
| abr-17  | 6,8 | 12,3 | 6,9  | 923,0  | 534,0  | 305,2 | 839,2  |
| jul-17  | 6,7 | 12,4 | 5,8  | 1123,0 | 534,0  | 305,2 | 839,2  |
| nov-17  | 7,1 | 12,3 | 2,2  | 828,0  | 605,2  | 261,6 | 866,8  |
| dic-17  | 6,9 | 11,9 | 8,5  | 1306,0 | 676,4  | 327,0 | 1003,4 |
| abr-18  | 6,9 | 12,2 | 1,6  | 1264,0 | 747,6  | 283,4 | 1031,0 |
| Media   | 6,8 | 12,2 | 5,8  | 1045,0 | 587,4  | 299,8 | 887,2  |
| <b>Mina de montaña Bolsada Caballes de Arriba</b> |     |      |      |        |        |       |        |
| abr-17  | 7,1 | 9,8  | 0,5  | 233,0  | 249,2  | 130,8 | 380,0  |
| jul-17  | 6,9 | 9,8  | 30,5 | 397,0  | 231,4  | 87,2  | 318,6  |
| nov-17  | 7,2 | 10,0 | 2,3  | 312,0  | 267,0  | 130,8 | 397,8  |
| dic-17  | 7,0 | 10,2 | 7,5  | 182,0  | 106,8  | 65,4  | 172,2  |
| abr-18  | 7,0 | 9,1  | 2,0  | 217,0  | 89,0   | 109,0 | 198,0  |
| Media   | 7,1 | 10,0 | 10,2 | 281,0  | 213,6  | 103,6 | 317,2  |
| <b>Mina de montaña Paulina</b>                    |     |      |      |        |        |       |        |
| abr-17  | 6,6 | 10,6 | 19,2 | 527,0  | 302,6  | 261,6 | 564,2  |
| jul-17  | 6,4 | 10,3 | 6,2  | 458,0  | 231,4  | 152,6 | 384,0  |
| nov-17  | 6,6 | 9,6  | 0,5  | 365,0  | 320,4  | 196,2 | 516,6  |





|                               |     |      |      |        |       |       |       |
|-------------------------------|-----|------|------|--------|-------|-------|-------|
| dic-17                        | 6,9 | 8,7  | 21,7 | 247,0  | 142,4 | 130,8 | 273,2 |
| abr-18                        | 6,8 | 10,4 | 12,0 | 550,0  | 284,8 | 305,2 | 590,0 |
| Media                         | 6,6 | 9,8  | 11,9 | 399,3  | 249,2 | 185,3 | 434,5 |
| <b>Pozo María</b>             |     |      |      |        |       |       |       |
| abr-17                        | 6,9 | 14,0 | 8,9  | 806,0  | 427,2 | 457,8 | 885,0 |
| jul-17                        | 6,6 | 14,1 | 12,7 | 1000,0 | 480,6 | 436,0 | 916,6 |
| nov-17                        | 6,8 | 13,7 | 12,0 | 762,0  | 462,8 | 501,4 | 964,2 |
| dic-17                        | 6,9 | 13,7 | 8,7  | 992,0  | 462,8 | 523,2 | 986,0 |
| abr-18                        | 7,0 | 13,4 | 17,1 | 946,0  | 534,0 | 392,4 | 926,4 |
| Media                         | 6,8 | 13,9 | 10,6 | 890,0  | 458,4 | 479,6 | 938,0 |
| <b>Transversal Villablino</b> |     |      |      |        |       |       |       |
| abr-17                        | 6,7 | 14,5 | 2,1  | 765,0  | 373,8 | 305,2 | 679,0 |
| jul-17                        | 6,5 | 14,6 | 1,3  | 878,0  | 391,6 | 348,8 | 740,4 |
| nov-17                        | 7,3 | 14,7 | 0,1  | 703,0  | 445,0 | 370,6 | 815,6 |
| dic-17                        | 7,3 | 14,7 | 0,1  | 845,0  | 409,4 | 348,8 | 758,2 |
| abr-18                        | 6,8 | 13,9 | 2,0  | 894,0  | 480,6 | 414,2 | 894,8 |
| Media                         | 7,0 | 14,6 | 0,9  | 797,8  | 405,0 | 343,4 | 748,3 |

Tabla nº28. Resultados generales de la campaña de muestreo.

Los valores de los parámetros del agua que se utilizarán en los capítulos posteriores serán los correspondientes a la media de los resultados obtenidos a lo largo del año, los cuales se recogen en la tabla nº29.



|                            | pH  | T (°C) | Turbidez (NTU) | Conductividad (μS/cm) | Dureza (mg/l CaCO <sub>3</sub> ) | Alcalinidad (ppm CaCO <sub>3</sub> ) | TDS (ppm CaCO <sub>3</sub> ) |
|----------------------------|-----|--------|----------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Mina montaña Calderón      | 7,2 | 14,4   | 1,4            | 1.393,8               | 823,3                            | 332,5                                | 1.155,7                      |
| Mina montaña Lumajo        | 7,0 | 12,9   | 10,5           | 528,0                 | 311,5                            | 256,2                                | 567,7                        |
| Mina montaña Carrasconte   | 6,6 | 12,5   | 52,0           | 1.663,8               | 987,9                            | 577,7                                | 1.565,6                      |
| Calderón transformadores   | 7,0 | 14,7   | 10,9           | 1.934,5               | 956,8                            | 490,5                                | 1.447,3                      |
| Bolsada Caballes de abajo  | 6,8 | 12,2   | 5,8            | 1.045,0               | 587,4                            | 299,8                                | 887,2                        |
| Bolsada Caballes de arriba | 7,1 | 10,0   | 10,2           | 281,0                 | 213,6                            | 103,6                                | 317,2                        |
| Mina Montaña Paulina       | 6,6 | 9,8    | 11,9           | 399,3                 | 249,2                            | 185,3                                | 434,5                        |
| Senda verde María          | 6,8 | 13,9   | 10,6           | 890,0                 | 458,4                            | 479,6                                | 938,0                        |
| Transversal Villablino     | 7,0 | 14,6   | 0,9            | 797,8                 | 405,0                            | 343,4                                | 748,3                        |

Tabla nº29. Valores medios de las medidas realizadas en los diferentes parámetros.

#### 4.2.2. Composición química de las aguas de mina del Valle Laciana

Durante la campaña de caracterización de las aguas del Valle Laciana llevada a cabo en 2017 se enviaron muestras al laboratorio especializado ALS GLOBAL para la determinación los cationes presentes en el agua de mina. De esta manera se obtuvo el contenido de metales pesados en el agua de las minas del Valle Laciana. La técnica utilizada es la denominada ICP-OES (espectroscopía de emisión atómica) debido a que presentan unos límites de detección muy sensibles y es competitiva económicamente.

Las etiquetas que se pueden observar en la tabla nº30 corresponden al lugar donde se tomaron:

1A: Mina de montaña de Calderón; 2A: Mina de montaña de Lumajo; 3A: Mina de montaña de Carrasconte; 4A: Calderón transformadores; 5A: Mina de montaña de Bolsada en Caboalles de Abajo; 6A: Mina de montaña de Bolsada en Caboalles de



Arriba; 7A: Mina de montaña de Paulina; 8A: Senda Verde María (Agua del pozo María); 9A: Transversal Villablino (Mina de montaña).



| ppb | 1A         | 2A        | 3A         | 4A         | 5A         | 6A        | 7A        | 8A        | 9A        | Lim RD 140/2003 |
|-----|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| B   | 38,97      | 20,75     | 42,17      | 59,96      | 19,76      | 6,55      | 4,72      | 31,44     | 64,75     | 1.000,00        |
| Na  | 51.435,96  | 6.398,10  | 75.707,21  | 319.880,58 | 33.698,19  | 6.341,67  | 6.142,92  | 56.447,92 | 38.301,78 | 200.000,00      |
| Mg  | 166.037,48 | 38.854,67 | 161.413,27 | 184.360,61 | 68.606,38  | 24.058,58 | 25.257,78 | 67.776,75 | 68.232,76 |                 |
| Al  | 8,30       | 8,05      | 21,45      | 10,51      | 7,16       | 17,17     | 6,74      | 9,02      | 10,75     | 200,00          |
| K   | 8.557,93   | 4.891,35  | 6.978,93   | 9.452,41   | 2.739,59   | 2.133,93  | 1.851,19  | 5.379,60  | 6.870,32  |                 |
| Ca  | 137.072,10 | 62.319,11 | 167.733,39 | 163.639,31 | 104.026,62 | 51.784,25 | 60.486,69 | 88.055,78 | 88.662,18 |                 |
| Ti  | 0,37       | 0,34      | 0,44       | 0,48       | 0,21       | 0,43      | 0,29      | 0,29      | 0,37      |                 |
| V   | 0,70       | 0,71      | 0,72       | 0,71       | 0,66       | 0,77      | 0,73      | 0,72      | 0,70      |                 |
| Cr  | -          | -         | 0,69       | 0,12       | -          | 0,44      | -         | -         | 0,28      | 50,00           |
| Mn  | 6,37       | 219,75    | 462,70     | 291,87     | 93,31      | 99,33     | 19,13     | 438,59    | 26,71     | 50,00           |
| Fe  | 186,02     | 737,69    | 5.114,01   | 2.637,19   | 455,86     | 386,78    | 329,45    | 1.799,48  | 102,80    | 200,00          |
| Co  | -          | 2,69      | 2,60       | 0,72       | 0,47       | 0,64      | 0,29      | 0,33      | 0,12      |                 |
| Ni  | 1,16       | 5,58      | 10,87      | 1,46       | 1,50       | 3,04      | 3,24      | 0,34      | 1,28      | 20,00           |
| Cu  | 0,40       | 0,32      | 17,33      | 0,41       | 0,42       | 6,94      | 1,26      | 0,30      | 0,63      | 2.000,00        |
| Zn  | 14,74      | 3,10      | 53,77      | 16,18      | 3,38       | 23,37     | 9,97      | 2,07      | 15,45     |                 |
| As  | 3,37       | 5,42      | 3,92       | 3,69       | 0,60       | 0,47      | 0,49      | 1,24      | 3,98      | 10,00           |
| Se  | 0,37       | 0,21      | 0,22       | 0,40       | 0,26       | 0,27      | 0,52      | 0,28      | 0,27      | 10,00           |
| Sr  | 1.913,03   | 298,28    | 973,89     | 1.882,42   | 917,06     | 198,12    | 261,98    | 855,01    | 726,10    |                 |
| Mo  | 1,56       | 0,59      | 0,87       | 1,66       | 0,62       | 0,45      | 0,57      | 0,79      | 0,83      |                 |
| Cd  | 0,13       | 0,13      | 0,31       | 0,11       | -          | 0,17      | 0,17      | 0,13      | 0,16      | 5,00            |
| Sn  | 4,60       | 4,54      | 4,49       | 4,53       | 6,78       | 6,39      | 2,48      | 4,34      | 4,82      |                 |
| Sb  | -          | -         | -          | -          | -          | -         | 0,20      | -         | 3,59      | 5,00            |
| Ba  | 32,94      | 35,86     | 23,18      | 28,28      | 59,64      | 65,64     | 67,59     | 76,03     | 60,70     |                 |
| Hg  | 0,24       | 0,30      | -          | 0,18       | 0,13       | 0,44      | -         | 0,10      | 0,32      | 1,00            |
| Tl  | 0,12       | -         | 0,10       | 0,10       | -          | 0,12      | -         | 0,10      | 0,12      |                 |
| Pb  | 0,43       | 0,40      | 15,45      | 0,43       | 0,39       | 7,20      | 0,84      | 0,41      | 0,53      | 10,00           |
| U   | 2,65       | 0,15      | 1,71       | 4,01       | 0,65       | 0,13      | 0,49      | 0,71      | 0,93      |                 |

Tabla nº30. Concentración de cationes (ppb) de las aguas de mina del Valle Laciana.



Para tener una referencia de la cantidad de cationes que se puede considerar aceptable en el agua se ha consultado el Real Decreto 140/2003 (Ministerio de la Presidencia 2003) por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Los criterios establecidos en este Real Decreto son más restrictivos que los necesarios en el agua para industria, por lo tanto, si alguna de las aguas de mina cumple los criterios, en cuanto a cationes disueltos en el agua, quiere decir que es apta para uso industrial.

Como podemos observar en la tabla nº30, las únicas aguas que cumplen todos los límites recogidos en la columna de la derecha son las de la muestra 1A (Mina de montaña de Villablino) y la de 9A (Transversal Villablino). El resto de las muestras presentan un contenido de manganeso o de hierro más altos que los permitidos por el RD 140/2003. Además, las muestras 3A (Mina de montaña de Carrasconte) y 4A (Calderón transformadores) tienen un contenido en plomo y sodio superior al estipulado por el Real Decreto mencionado, respectivamente.

#### **4.3. NATURALEZA CORROSIVA O INCRUSTANTE DE LAS AGUAS**

El objetivo de la campaña de campo es el de conseguir la información suficiente como para poder evaluar la viabilidad de las aguas de mina para hacerlas pasar por un intercambiador de calor o una red de tuberías sin que se vea comprometida su durabilidad. Para esto, las aguas utilizadas deben ser neutras, es decir, que no sean de naturaleza corrosiva ni de naturaleza incrustante (Rafferty 2000).

Fenómenos de esta naturaleza pueden afectar a la eficiencia de los equipos de intercambio y por tanto deben evitarse mediante un correcto tratamiento del agua utilizada (Teng, K.H., Baharudin, R.H., Bakar, M.A. & Kazi 2016; Kukulka, D.J. & Devgun 2007; Vasauskas, V. & Baskutis 2006).

Para determinar el potencial corrosivo e incrustante de las aguas del Valle Laciana se han calculado los índices de Langelier (LSI) y de Ryznar (RSI), comúnmente utilizados para determinar la naturaleza del agua en procesos industriales (Rafferty 2000). La interpretación del significado de estos índices se puede ver en la tabla nº31:



| LSI Index | Categoría                           | RSI Index | Categoría                         |
|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 2         | Incrustante y no corrosiva          | 4.00-5.00 | Gravemente incrustante            |
| 0,5       | Ligeramente incrustante y corrosiva | 5.00-6.00 | Ligeramente incrustante           |
| 0,02      | Equilibrada pero algo corrosiva     | 6.00-7.00 | Poco incrustante o poco corrosiva |
| -0,5      | Muy corrosiva y nada incrustante    | 7.00-7.50 | Significativamente corrosiva      |
| -2        | Gravemente corrosiva                | 7.50-9.00 | Gravemente corrosiva              |
|           |                                     | > 9.00    | Corrosión intolerable             |

Tabla nº31. Interpretación de los índices de Langelier y de Ryznar (Carrier Air Conditioning Company 1965).

El cálculo de estos índices fue recogido por (Edstrom 1998):

$$LSI = pH - pHs$$

$$RSI = 2pHs - pH$$

El término pHs corresponde al pH que tendría el agua cuando se encuentra saturada de  $CaCO_3$  y es función de la temperatura, de la alcalinidad, de la dureza por carbonatos y de los sólidos totales disueltos.

$$pHs = 9,3 + A + B - C - D$$

siendo,

$$A = (\log(TDS) - 1) / 10 \quad \text{TDS en ppm}$$

$$B = (-13,12 * \log(^{\circ}C + 273)) + 34,55 \quad \text{Temperatura en } ^{\circ}C$$

$$C = (\log(\text{dureza por carbonatos}) - 0,4) \quad \text{Dureza por carbonatos en ppm (de } CaCO_3)$$

$$D = \log(\text{alcalinidad}) \quad \text{Alcalinidad en ppm (de } CaCO_3)$$

La dureza por carbonatos puede asemejarse a la dureza total, en caso de que se quiera estar del lado de la seguridad, puesto que la dureza total está compuesta fundamentalmente por sales de calcio y magnesio, siendo las de calcio las que más contribuyen a la incrustación (Rafferty 2000).

Todos los parámetros necesarios para calcular los índices de Langelier y de Ryznar se pueden obtener directamente de los ensayos realizados en campo a excepción de los sólidos totales disueltos (TDS). Se han utilizado dos métodos para estimar este parámetro:



- Existe una relación entre el TDS expresado en mg/l y la conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$ . La relación varía entre 0,55 y 0,80 y aumenta según aumentan los valores de TDS y conductividad (Atekwana, E.A., Rowe, R.S., Werkema, D.D. & Legall 2004). El valor considerado para obtener el TDS a partir de la conductividad ha sido 0,64 según propusieron (Iyasele, J.U. & David 2015).
- Por otro lado, los sólidos totales disueltos es la suma de la concentración de todas las sustancias contenidas en un líquido ya bien sea en forma molecular, ionizada o en suspensión (DeZuane 1997). Por lo tanto, tendría que ser al menos la suma de la dureza total (representada, en esencia, por los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y la alcalinidad (representada fundamentalmente por el ion  $\text{HCO}_3$ ) (Rafferty 2000).

| Id | Nombre                      | TDS 1 (ppm $\text{CaCO}_3$ ) | TDS 2 (ppm $\text{CaCO}_3$ ) | Diferencia (%) |
|----|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| 1  | Mina montaña Calderón       | 1.155,7                      | 892,0                        | 22,8%          |
| 2  | Mina montaña Lumajo         | 567,7                        | 337,9                        | 40,5%          |
| 3  | Mina montaña Carrasconte    | 1.565,6                      | 1.064,8                      | 32,0%          |
| 4  | Calderón transformadores    | 1.447,3                      | 1.238,1                      | 14,5%          |
| 5  | Bolsada Caboalles de abajo  | 887,2                        | 668,8                        | 24,6%          |
| 6  | Bolsada Caboalles de arriba | 317,2                        | 179,8                        | 43,3%          |
| 7  | Mina Montaña Paulina        | 434,5                        | 255,5                        | 41,2%          |
| 8  | Senda verde María           | 938,0                        | 569,6                        | 39,3%          |
| 9  | Transversal Villablino      | 748,3                        | 510,6                        | 31,8%          |

Tabla nº32. Diferencias en las obtenciones del TDS.

A pesar de que los valores del TDS difieren significativamente utilizando un método y otro, tal y como se puede ver en la tabla nº32, los valores calculados de los índices de Langelier y de Ryznar apenas varían utilizando ambos valores del TDS, por lo tanto, los resultados de la campaña de campo se consideran válidos para calcular los mencionados índices.

Los valores de los índices utilizados en los estudios de alternativas posteriores son los correspondientes al cálculo con el TDS obtenido a partir de la suma de dureza y alcalinidad.

Se muestran a continuación los cálculos de los índices de Langelier y de Ryznar para cada uno de los lugares analizados, utilizando los valores medios de los parámetros obtenidos en la campaña de campo:



- Mina de montaña de Calderón

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 14,50    |
| <b>pH</b>                          | 7,19     |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 823,25   |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 332,45   |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 1.155,70 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,21 |
| <b>B =</b> | 2,29 |
| <b>C =</b> | 2,52 |
| <b>D =</b> | 2,52 |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| <b>pHs =</b>              | 6,76 |
| <b>LSI =</b>              | 0,43 |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 6,33 |

(Ligeramente incrustante y corrosiva)

(Poco incrustante o poco corrosiva)

- Mina de montaña de Lumajo

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 12,90  |
| <b>pH</b>                          | 7,04   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 311,50 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 256,15 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 567,65 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,18 |
| <b>B =</b> | 2,32 |
| <b>C =</b> | 2,09 |
| <b>D =</b> | 2,41 |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>pHs =</b>              | 7,30  |
| <b>LSI =</b>              | -0,26 |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 7,56  |

(Equilibrada pero algo corrosiva)

(Gravemente corrosiva)





- Mina de montaña de Carrasconte

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 12,50    |
| <b>pH</b>                          | 6,59     |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 987,90   |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 577,70   |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 1.565,60 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,22 |
| <b>B =</b> | 2,33 |
| <b>C =</b> | 2,59 |
| <b>D =</b> | 2,76 |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| <b>pHs =</b>              | 6,50 |
| <b>LSI =</b>              | 0,10 |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 6,40 |

(Ligeramente incrustante y corrosiva)

(Poco incrustante o poco corrosiva)

- Calderón Transformadores

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 14,65    |
| <b>pH</b>                          | 7,04     |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 956,75   |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 490,50   |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 1.447,25 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,22 |
| <b>B =</b> | 2,29 |
| <b>C =</b> | 2,58 |
| <b>D =</b> | 2,69 |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| <b>pHs =</b>              | 6,53 |
| <b>LSI =</b>              | 0,50 |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 6,03 |

Incrustante y no corrosiva

(Poco incrustante o poco corrosiva)



- Bolsada Caballes de Abajo

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 12,23  |
| <b>pH</b>                          | 6,84   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 587,40 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 299,75 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 887,15 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,19 |
| <b>B =</b> | 2,34 |
| <b>C =</b> | 2,37 |
| <b>D =</b> | 2,48 |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>pHs =</b>              | 6,99                                    |
| <b>LSI =</b>              | -0,14 (Equilibrada pero algo corrosiva) |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 7,13 (Significativamente corrosiva)     |

- Bolsada Caballes de Arriba

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 9,95   |
| <b>pH</b>                          | 7,05   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 213,60 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 103,55 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 317,15 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,15 |
| <b>B =</b> | 2,38 |
| <b>C =</b> | 1,93 |
| <b>D =</b> | 2,02 |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>pHs =</b>              | 7,89                                     |
| <b>LSI =</b>              | -0,84 (Muy corrosiva y nada incrustante) |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 8,73 (Gravemente corrosiva)              |



- Mina de montaña de Paulina

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 9,80   |
| <b>pH</b>                          | 6,61   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 249,20 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 185,30 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 434,50 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,16 |
| <b>B =</b> | 2,39 |
| <b>C =</b> | 2,00 |
| <b>D =</b> | 2,27 |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>pHs =</b>              | 7,59                                     |
| <b>LSI =</b>              | -0,98 (Muy corrosiva y nada incrustante) |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 8,57 (Gravemente corrosiva)              |

- Senda verde María

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 13,88  |
| <b>pH</b>                          | 6,80   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 458,35 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 479,60 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 937,95 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,20 |
| <b>B =</b> | 2,31 |
| <b>C =</b> | 2,26 |
| <b>D =</b> | 2,68 |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>pHs =</b>              | 6,86                                     |
| <b>LSI =</b>              | -0,06 (Equilibrada pero algo corrosiva)  |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 6,92 (Poco incrustante o poco corrosiva) |



- Transversal Villablino

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| <b>Temperatura °C</b>              | 14,63  |
| <b>pH</b>                          | 6,95   |
| <b>Dureza por carbonatos (ppm)</b> | 404,95 |
| <b>Alcalinidad total (ppm)</b>     | 343,35 |
| <b>TDS (ppm CaCO<sub>3</sub>)</b>  | 748,30 |

|            |      |
|------------|------|
| <b>A =</b> | 0,19 |
| <b>B =</b> | 2,29 |
| <b>C =</b> | 2,21 |
| <b>D =</b> | 2,54 |

|                           |       |                                   |
|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| <b>pHs =</b>              | 7,03  |                                   |
| <b>LSI =</b>              | -0,08 | (Equilibrada pero algo corrosiva) |
| <b>Índice de Ryznar =</b> | 7,12  | (Significativamente corrosiva)    |

El resumen de los cálculos de los índices de Langelier (LSI) y de Ryznar se recoge en la tabla nº33:

| <b>Muestra</b>             | <b>Índice de Langelier (LSI)</b> |                                       | <b>Índice de Ryznar</b> |                                     |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Mina montaña Calderón      | 0,43                             | (Ligeramente incrustante y corrosiva) | 6,33                    | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Mina montaña Lumajo        | -0,26                            | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,56                    | (Gravemente corrosiva)              |
| Mina montaña Carrasconte   | 0,10                             | (Ligeramente incrustante y corrosiva) | 6,40                    | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Calderón transformadores   | 0,50                             | Incrustante y no corrosiva            | 6,03                    | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Bolsada Caballes de abajo  | -0,14                            | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,13                    | (Significativamente corrosiva)      |
| Bolsada Caballes de arriba | -0,84                            | (Muy corrosiva y nada incrustante)    | 8,73                    | (Gravemente corrosiva)              |
| Mina Montaña Paulina       | -0,98                            | (Muy corrosiva y nada incrustante)    | 8,57                    | (Gravemente corrosiva)              |
| Senda verde María          | -0,06                            | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 6,92                    | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Transversal Villablino     | -0,08                            | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,12                    | (Significativamente corrosiva)      |

Tabla nº33. Resumen de los valores de los índices LSI y Ryznar de las aguas de las minas del Valle Laciana tomando el TDS como suma de dureza y alcalinidad



En la tabla nº34 se muestra el resumen del cálculo de los índices tomando el TDS igual a la conductividad multiplicada por 0,64:

| Muestra                     | Índice de Langelier (LSI) |                                       | Índice de Ryznar |                                     |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Mina montaña Calderón       | 0,44                      | (Ligeramente incrustante y corrosiva) | 6,31             | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Mina montaña Lumajo         | -0,24                     | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,51             | (Gravemente corrosiva)              |
| Mina montaña Carrasconte    | 0,11                      | (Ligeramente incrustante y corrosiva) | 6,37             | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Calderón transformadores    | 0,51                      | Incrustante y no corrosiva            | 6,02             | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Bolsada Caboalles de abajo  | -0,13                     | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,11             | (Significativamente corrosiva)      |
| Bolsada Caboalles de arriba | -0,81                     | (Muy corrosiva y nada incrustante)    | 8,68             | (Gravemente corrosiva)              |
| Mina Montaña Paulina        | -0,96                     | (Muy corrosiva y nada incrustante)    | 8,52             | (Gravemente corrosiva)              |
| Senda verde María           | -0,04                     | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 6,87             | (Poco incrustante o poco corrosiva) |
| Transversal Villablino      | -0,07                     | (Equilibrada pero algo corrosiva)     | 7,09             | (Significativamente corrosiva)      |

Tabla nº34. Resumen de los valores de los índices LSI y Ryznar de las aguas de las minas del Valle Laciana estimando los TDS a partir de la conductividad eléctrica.

#### 4.4. VARIACIÓN DE CAUDALES DE AGUA EN ÉPOCA HÚMEDA Y SECA

En este apartado se presentan las figuras de la nº41 a la nº53 con las que se pretende ilustrar la variación del caudal de agua que se puede encontrar, en cada uno de los puntos de muestreo, durante las épocas húmedas y secas del año.



En las figuras nº41 y nº42 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la mina de montaña de Calderón.



Figura nº41. Mina de montaña de Calderón en primavera (época húmeda).



Figura nº42. Mina de montaña de Calderón en otoño/invierno (época seca).



En las figuras nº43 y nº44 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la mina de montaña de Lumajo.



Figura nº43. Mina de montaña de Lumajo en primavera (época húmeda).



Figura nº44. Mina de montaña de Lumajo en otoño/invierno (época seca).



En las figuras nº45 y nº46 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la mina de montaña de Carrasconte.



Figura nº45. Mina de montaña de Carrasconte en primavera (época húmeda).



Figura nº46. Mina de montaña de Carrasconte en otoño/invierno (época seca).





En las figuras nº47 y nº48 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la mina de montaña de Bolsada Caboalles de Abajo.



Figura nº47. Mina de montaña de Bolsada Caboalles de Abajo en primavera (época húmeda).



Figura nº48. Mina de montaña de Bolsada Caboalles de Abajo en otoño/invierno (época seca).



En las figuras nº49 y nº50 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la mina de montaña de Paulina.



Figura nº49. Mina de montaña de Paulina de Abajo en primavera (época húmeda).



Figura nº50. Mina de montaña de Paulina en otoño/invierno (época seca).



En las figuras nº51 y nº52 se pueden ver las diferencias de caudal entre la estación seca y la estación húmeda en la senda verde María, que drena las aguas de mina del pozo María.

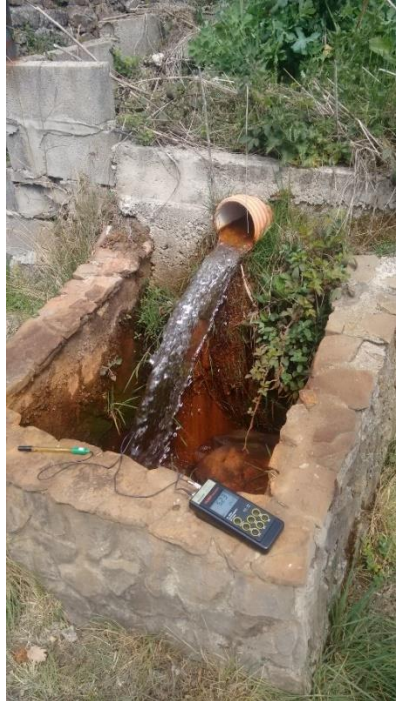


Figura nº51. Senda Verde María en primavera (época húmeda).



Figura nº52. Senda verde María en otoño/invierno (época seca).



En la figura nº53 se pueden ver el estado del transversal de Villablino en la estación húmeda.



Figura nº53. Transversal Villablino en primavera (época húmeda).

El objetivo de esta recopilación de imágenes es mostrar la gran variación de caudal de agua de mina que sale por las bocaminas del Valle Laciana en época húmeda y época seca. En el capítulo VII se mostrará el cálculo de caudal que se extrae de la bocamina elegida como más favorable y se constatará este hecho.



# CAPÍTULO V. COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS EXISTENTES



## 5. ESTUDIO Y COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS EXISTENTES

En el presente capítulo se va a hacer un estudio comparativo de las diferentes alternativas tecnológicas para el aprovechamiento energético de las aguas de mina del Valle Laciana.

Para ello se ha elaborado un análisis de las posibles formas de aprovechamiento energético de estas aguas teniendo en cuenta aspectos particulares del Valle Laciana y de los emplazamientos estudiados.

Las alternativas estudiadas se enumeran a continuación:

1. Aprovechamiento geotérmico (circuito abierto).
2. Aprovechamiento geotérmico (circuito cerrado).
3. Aprovechamiento hidroeléctrico (salto hidroeléctrico).
4. Aprovechamiento hidroeléctrico (microturbinas).

El objetivo de los análisis de alternativas es exponer una recopilación de información sobre unas variables que son ponderadas analíticamente. Para ello se emplean técnicas específicas que muestran las fortalezas y las ventajas de diversas alternativas incluso en ocasiones en las que sea difícil encontrar atributos convincentes en cada una de ellas (George 2010).

Para este análisis de alternativas se va a ejecutar un análisis multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés), por sus siglas en inglés, ya que se va a tener que elegir entre múltiples criterios, tanto cuantificables como no cuantificables (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

El desarrollo de este tipo de análisis empezó en 1896 con los estudios de Pareto y fue culminado por Debreu en 1959 (Wierzbicki 1982).

En general, los MCDM se pueden dividir en dos grupos:

- Análisis multiatributo (MADM).
- Análisis multiobjetivo (MODM).

La diferencia entre ambos radica fundamentalmente en la definición de las alternativas. Si las alternativas están completamente definidas y se elige entre una de ellas se ejecutará un MADM, como es nuestro caso. Si las alternativas no están definidas y el estudio está enfocado a lograr de la manera más eficientemente posible una serie de objetivos, entonces se realizará un MODM (San-Cristóbal 2011).

Existen diversos métodos para llevar a cabo un MADM, en general, se asume que no hay una metodología mejor que otra, sino que hay algunas que se adaptan mejor a la naturaleza del



análisis que se está llevando a cabo (Haralambopoulos, D.A. & Polatidis 2003), en nuestro caso, estudio de alternativas energéticas.

Hay numerosos autores (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009; Triantaphyllou 2000; Strantzali, E. & Aravossis 2016; Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004) que han estudiado los diversos tipos de técnicas a utilizar para ver sus bondades y sus debilidades. Entre las técnicas más destacadas se encuentran:

- WSM
- WPM
- AHP
- PROMETHEE
- ELECTRE
- TOPSIS
- MADM difusos

## 5.1 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS EXISTENTES

### 5.1.1. WSM

El modelo de suma ponderada (WSM, por sus siglas en inglés), se trata de uno de los métodos más utilizados para evaluar análisis de alternativas, especialmente cuando los problemas son unidimensionales, es decir, cuando los criterios que se evalúan tienen las mismas unidades (monetarias, temporales, espaciales). Cuando se deben evaluar criterios que utilizan diferentes unidades, por ejemplo, euros y metros cúbicos por hora, este modelo carece de sentido (Triantaphyllou 2000; Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

Si existen  $m$  alternativas y  $n$  criterios a utilizar en el análisis, la mejor alternativa, en el caso de maximización, será la que satisfaga la siguiente expresión (Fishburn 1967):

$$A_{WSM} = \max \sum_{j=1}^n a_{ij}w_j \quad \text{para } i = 1,2,3, \dots, m$$

Siendo  $a_{ij}$  el valor de la alternativa  $i$  según el criterio  $j$  y  $w$  el peso otorgado al criterio  $j$ .

### 5.1.2. WPM

El modelo de producto ponderado (WPM) es muy similar al WSM, la diferencia radica en la sustitución de la suma de los factores por su producto. La gran virtud de este método con



respecto al anterior es que el análisis es adimensional puesto que se comparan los valores de dos alternativas, por lo tanto, se puede utilizar en problemas multidimensionales. (Triantaphyllou 2000).

Cada una de las alternativas son comparadas entre sí una a una siguiendo la siguiente formulación (Miller, D.W. & Starr 1969):

$$R(A_K/A_L) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj}/a_{Lj})^{w_j}$$

Donde  $n$  es el número del criterio,  $a_{Kj}$  es el valor de la alternativa  $A_K$  correspondiente al criterio  $j$ ,  $a_{Lj}$  es el valor de la alternativa  $A_L$  correspondiente al criterio  $j$  y  $w_j$  es el peso de importancia del criterio  $j$ . Si el término  $R(A_K/A_L)$  es mayor a la unidad, entonces la alternativa  $A_K$  es mejor que la alternativa  $A_L$ . La mejor alternativa es aquella cuyos términos  $R(A_K/A_L)$  son mayores o iguales a la unidad, una vez se compara con el resto de las alternativas (Triantaphyllou 2000; Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

### 5.1.3. AHP

El procedimiento jerárquico analítico (AHP) tiene como ventaja la reducción del problema de una manera lógica en pequeños subproblemas relacionados con el principal y que se distribuyen en distintos niveles de jerarquía. De esta manera, se le permite al ente de decisión poder abordar los problemas de una forma más eficiente (Kablan 2004).

El método fue propuesto por primera vez por (Saaty 1980) y calcula ratios de importancia para cada alternativa a través de una comparación por pares entre cada una de ellas.

Para ello se realiza una descomposición del problema de decisión en varios niveles jerárquicos situando el objetivo final en el nivel más alto, posteriormente se sitúan los criterios y subcriterios, y, por último, en el nivel más bajo, se sitúan cada una de las alternativas. Los elementos de una misma jerarquía son comparados entre sí para ver sus relaciones de preferencia, posteriormente se multiplica por el coeficiente asignado al elemento del nivel superior (y que ha sido utilizado para realizar la comparación por pares).

La matriz de la comparación por pares teniendo en cuenta que hay  $n$  criterios en un nivel determinado quedaría de la siguiente forma:

$$D = \begin{bmatrix} C_1/C_1 & \cdots & C_1/C_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n/C_1 & \cdots & C_n/C_n \end{bmatrix}$$





El procedimiento se repite con cada uno de los niveles jerárquicos hasta llegar a la cúspide. Se calcula entonces el coeficiente de peso con respecto al objetivo para cada alternativa y la que tenga el mayor valor es la alternativa más ventajosa (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

El AHP se puede considerar un tipo de WSM ya que una vez se obtienen los coeficientes de ponderación se multiplican los valores de cada alternativa por el peso correspondiente y se realiza una suma para obtener el resultado final (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

La mejor alternativa es la que satisface la siguiente relación:

$$A_{AHP} = \max \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, m$$

La diferencia con el WSM es que AHP utiliza valores relativos (obtenidos de la comparación por pares entre alternativas) en vez de los valores directos (Triantaphyllou 2000).

#### 5.1.4. PROMETHEE

Se trata de un método de clasificación por rango en el que se comparan las alternativas disponibles, de manera que para cada par de alternativas comparadas se tengan suficientes argumentos para declarar que una alternativa es al menos tan buena como la otra, si no mejor, y que, al mismo tiempo, no existe una razón de peso que invalide el juicio (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009). Una de las ventajas de los métodos de clasificación por rango es que permiten la comparación incluso cuando dos alternativas no se pueden comparar, debido a su clasificación relativa con otras alternativas con las que sí que ha sido posible su comparación (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009; Strantzali, E. & Aravossis 2016).

Cada alternativa se clasifica en relación a un número de criterios utilizando las funciones de preferencia  $P_j(a, b)$ . (Brans, J.P., Vincke, P.H & Mareschal 1986) propuso seis funciones para comparar las alternativas en la clasificación por rango que son:

- Criterio usual
- Quasi-criterio
- Criterio con preferencia lineal
- Criterio de nivel
- Criterio con preferencia lineal e indiferencia de área
- Criterio gaussiano



Una vez se tienen evaluadas las alternativas conforme a las funciones de preferencia, la clasificación se elabora teniendo en cuenta el índice de preferencia  $\pi(A_i, A_k)$ :

$$\pi(A_i, A_k) = \frac{\sum_{j=1}^j w_j P_j(A_i, A_k)}{\sum_{j=1}^j w_j}$$

Se le llama flujo de entrada de la alternativa “ $A_i$ ” al siguiente sumatorio:

$$\varphi^+(A_i) = \sum_{k=1}^m \pi(A_i, A_k) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots, m$$

Siendo el flujo de salida de la alternativa “ $A_i$ ”:

$$\varphi^-(A_i) = \sum_{k=1}^m \pi(A_k, A_i) \quad \text{para } k = 1, 2, 3, \dots, m$$

La diferencia entre los flujos de entrada y de salida de una alternativa se llama flujo neto. La alternativa que tenga un flujo neto superior es la opción más ventajosa (Haralambopoulos, D.A. & Polatidis 2003; Pohekar, S. D. & Ramachandran 2004; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

### 5.1.5. ELECTRE

El método ELECTRE se trata de otro modelo de clasificación por rangos, como PROMETHEE. La diferencia entre ambos es que PROMETHEE tiene en cuenta la diferencia de nivel entre las alternativas, mientras que ELECTRE lo único que tiene en cuenta es el orden de preferencia (Strantzali, E. & Aravossis 2016; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

ELECTRE fue propuesto por primera vez por Benayoun, Roy y Sussman en 1966 y fue desarrollado y mejorado posteriormente por Roy en 1971 (Benayoun, R., Roy, B. & Sussman 1966; Roy 1968; Roy, B. & Bertier 1973; Roy 1978). Se realiza una comparación por pares y se dice que una alternativa domina a otra si es mejor que ella al menos en un criterio y no es peor que ella en ningún otro.

El autor del estudio puede llegar a las siguientes conclusiones después de ejecutar la comparación entre dos alternativas:

- La comparación entre estas dos alternativas es indiferente con respecto al objetivo buscado.
- Una de las dos alternativas tiene un determinado grado de preferencia con respecto a la otra.
- No se puede expresar la relación de preferencia entre ambas alternativas.



Por lo tanto, la clasificación por rangos no tiene por qué estar completa y puede ser que se produzca una indefinición a la hora de encontrar la mejor alternativa. Lo que sí que permite el método es identificar una serie de alternativas que tienen un gran potencial para satisfacer los objetivos buscados. Esta metodología resulta especialmente útil cuando se tienen muchas alternativas y pocos criterios de comparación (Triantaphyllou 2000).

#### 5.1.6. TOPSIS

Este método fue desarrollado por (Huang, C.L. & Yoon 1981) en 1980 como una alternativa a ELECTRE. El concepto fundamental es obtener la alternativa que se distancie menos de la solución ideal y/o que se distancie lo máximo posible de la solución pésima (Strantzali, E. & Aravossis 2016). Se asume que cada criterio tiene una tendencia monótona creciente o decreciente y que por ello se pueden obtener las soluciones ideales.

En primer lugar, se debe crear una matriz de decisión que incluya las M alternativas y los N criterios a utilizar. Posteriormente, se definen los coeficientes de ponderación de cada criterio y por último se calcula la distancia relativa entre cada una de las alternativas a la solución ideal (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

La fórmula utilizada para medir la distancia a la solución ideal es la popularmente conocida distancia euclidiana (Triantaphyllou 2000).

$$h_i = \sum_{j=1}^n w_j^2 (x_{ij} - x_j)^2$$

Este método se puede utilizar como método de ponderación y como método de análisis multicriterio (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

#### 5.1.7. MADM difusos

Todos los MADM vistos hasta ahora dan unos valores numéricos claros que clasifican o atribuyen un determinado número a las distintas alternativas. Muchas veces la toma de datos o la información con la que se cuenta para tomar una decisión no es clara (Karsak, E.E. & Dursun 2015; Gul, M. & Guneri 2016), por lo tanto, no tiene sentido, en algunas ocasiones, que el resultado de un análisis de alternativas sea categórico (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

La teoría difusa introducida por Zadeh en 1965 (Zadeh 1965) termina con esta contradicción asignando una importancia relativa a los atributos utilizando números difusos en vez de



números precisos (Chaghooshi, A.J., Fathi, M.R. & Kasherf 2012; Sengül, Ü., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015).

La combinación de MADM con la teoría difusa, considerando variables lingüísticas en la evaluación de los criterios y alternativas, tiene la capacidad de asumir las incertidumbres que pueden venir de los errores o faltas en la toma de datos y de la consideración de soluciones ideales positivas y negativas a la vez (Mahdevari, S., Shahriar, K. & Esfahanipour 2014).

## 5.2 SELECCIÓN DE METODOLOGÍA

Todos los métodos tienen sus ventajas y desventajas y corresponde al autor elegir el procedimiento más adecuado para el problema que estudie (Strantzali, E. & Aravossis 2016). La selección de la metodología a utilizar en esta tesis se ha tomado en base a las referencias encontradas en la bibliografía consultada.

(Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015) afirman que el procedimiento jerárquico analítico (AHP) es el método subjetivo de ponderación más extendido en los estudios de alternativas de sistemas energéticos. (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004) añade que la razón de que este procedimiento esté tan extendido es debido a su capacidad de convertir un problema complejo en varios subproblemas, a través de un sistema flexible e intuitivo de jerarquías. En su estudio se encontraron más de 100 ejemplos donde se utilizaron análisis multicriterio para escoger alternativas energéticas. El estudio concluye que la técnica más popular es la AHP seguida de los métodos de clasificación por rango PROMETHEE y ELECTRE (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004).

Se ha elaborado la tabla nº35 en base a la bibliografía consultada (Bose, D. & Bose 1995; Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015; Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S. & Melin 2010; Goumas, M.G., Lygerou, V.A. & Papayannakis 1999; Goumas, M. & Lygerou 2000; Gul, M. & Guneri 2016; Haralambopoulos, D.A. & Polatidis 2003; Kablan 2004; Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004; San-Cristóbal 2011; Šarka, V., Zavadskas, E.K., Ustinovičius, L. & Ignatavičius 2010; Sengül, Ü., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015; Strantzali, E. & Aravossis 2016; Triantaphyllou 2000; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009; Triantaphyllou, E, & Mann 1995):



| Aplicación                           | Autor                                | MADM |     |           |         |        |       |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------|-----|-----------|---------|--------|-------|
|                                      |                                      | MAUT | AHP | PROMETHEE | ELECTRE | TOPSIS | FUZZY |
| Proyectos y planificación energética | (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004) | 4    | 14  | 7         | 10      | -      | -     |
|                                      | (Strantzali, E. & Aravossis 2016)    | -    | 6   | 4         | 1       | 3      | 2     |
|                                      | Elaboración propia                   | -    | 5   | 4         | -       | 4      | 2     |
| TOTAL                                |                                      | 4    | 25  | 15        | 11      | 7      | 4     |

Tabla nº35. Recopilación bibliográfica de la utilización de MADM en análisis de alternativas energéticas.

En la tabla nº35 se recoge el número de estudios que han utilizado una determinada metodología según los diversos autores consultados. Por ejemplo, (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004) han realizado una investigación bibliográfica en la que han encontrado 14 estudios de proyectos y planificación energética en los que se utilizaba la metodología AHP como selección de alternativas. En la columna de “elaboración propia” se han incluido el número de estudios buscados por el autor y que no estaban incluidos ni en (Pohekar, S .D. & Ramachandran 2004), ni en (Strantzali, E. & Aravossis 2016). Como se puede observar en la tabla nº35, la metodología más veces utilizada en los estudios de alternativas energéticas es la metodología AHP.

La elección de la metodología a utilizar es propia del autor del estudio, siendo cualquiera de las expuestas efectiva para el objeto de la tesis. Teniendo en cuenta los resultados de la recopilación bibliográfica llevada a cabo por el autor de la tesis, se ha decidido utilizar el procedimiento jerárquico analítico (AHP) en los análisis de alternativas a realizar. Además, se seguirá el consejo de (Hobbs, B.F. & Horn 1997) y se incorporará un segundo método de evaluación. Se transformará la puntuación obtenida en el AHP utilizando un análisis difuso siguiendo, de esta manera, la tendencia de los métodos de evaluación actuales que buscan la flexibilidad y la incorporación de la gestión de incertidumbres (Strantzali, E. & Aravossis 2016).



### 5.3 METODOLOGÍA DEL PROCEDIMIENTO JERÁRQUICO (AHP)

Cualquier metodología de análisis multicriterio utilizada para la selección de alternativas debe seguir los siguientes pasos:

1. Definir las alternativas a valorar y establecer los criterios de comparación. Estas tareas se realizarán en los apartados 5.4 y 5.5 del presente capítulo.
2. Asignar las ponderaciones de los criterios y subcriterios utilizados para evaluar a las alternativas. Esta tarea se ha recogido en el apartado 5.5.3. del presente capítulo.
3. Procesar la valoración de las alternativas estableciendo un ranking para cada una de ellas. Este es el objetivo final del capítulo (Triantaphyllou 2000).

El procedimiento seleccionado para llevar a cabo la comparación entre las tecnologías existentes para ser implantadas en el valle Laciana es el procedimiento jerárquico analítico (AHP). La metodología de desarrollo del procedimiento está englobada en la metodología general antes mencionada. Sin embargo, a continuación, se recoge su metodología resumida (Saaty 1980; Kablan 2004):

1. Definir el objetivo del problema junto con las alternativas a evaluar y establecer los criterios y subcriterios que se van a tener en cuenta para solucionarlo.
2. Estructurar el problema mediante niveles de jerarquía: Objetivo, alternativas, criterios, y subcriterios.
3. Realizar los siguientes pasos desde el último nivel de jerarquía, en este caso los subcriterios:
  - a. Realizar una comparación por pares de cada elemento de la jerarquía elaborando una matriz  $N \times N$  donde queden reflejados los resultados de la comparación.
  - b. Calcular las prioridades normalizando el vector de cada columna y haciendo la media de cada una de las filas. De esta manera se obtendrá el vector de prioridad. El vector de prioridad corresponde a los coeficientes de ponderación en el caso de la evaluación de los criterios y los subcriterios, y a la valoración de alternativas en la evaluación de alternativas.
  - c. Comprobar la consistencia de la matriz  $N \times N$  elaborada para asegurar que los valores asignados a cada uno de los elementos de la jerarquía son consistentes.
4. Repetir el paso 3 con todos los niveles jerárquicos.
5. Sintetizar las prioridades locales para obtener una prioridad global para cada una de las alternativas.



## 5.4 DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS

### 5.4.1 Aprovechamiento geotérmico (circuito abierto).

Los aprovechamientos geotérmicos utilizan el calor que existe en el interior de la tierra para un uso energético (Self, S.J., Reddy, B.V. & Rosen 2013; Dehkordi, S.E. & Schincariol 2014). El uso energético de la geotermia puede ser térmico o eléctrico dependiendo de la capacidad energética que se pueda obtener. La geotermia de alta entalpía cuenta con un potencial calorífico grande y puede generar electricidad, mientras que la geotermia de baja entalpía no tiene un potencial energético tan grande y su uso está más centrado en la climatización de edificios (Ingvar 2006; Rybach 2014).

En el caso del aprovechamiento energético del agua de mina del valle Laciana nos centraremos en el aprovechamiento geotérmico de baja entalpía debido a la baja temperatura con la que sale el agua de las minas (9-14°C) (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a).

Se han considerado dos posibles configuraciones de circuito para los aprovechamientos geotérmicos de las aguas de mina del Valle Laciana, circuito cerrado y circuito abierto.

En los aprovechamientos geotérmicos con circuito abierto se hace pasar directamente el agua subterránea por un intercambiador de calor. El agua almacenada en acuíferos subterráneos transmite directamente su energía térmica a un circuito secundario que conforma el evaporador de la enfriadora o bomba de calor (Self, S.J., Reddy, B.V. & Rosen 2013). Una vez haya pasado el agua por el intercambiador se pueden dar dos opciones, que se reinyecte el agua en el acuífero o que se conduzca el agua hasta cauces naturales.

En el caso concreto estudiado, el agua de las minas sale naturalmente por las bocaminas debido a la influencia del nivel freático, por tanto, no tiene sentido volver a inyectarlo en la mina. Además, se considera que para evaluar correctamente la viabilidad de reinyección del agua en la mina se debería tener un exhaustivo conocimiento de la situación geométrica, estructural, hidrogeológica e hidroquímica de todas las minas estudiadas (Peralta, E. & Falcone 2013; Jardón 2010). No se disponen de datos suficientes para elaborar este estudio, por lo tanto, se ha optado por estudiar una alternativa más sencilla e igualmente viable, es decir, que el agua se conduzca hasta cauces naturales.

En la figura nº54 se puede observar la configuración de un aprovechamiento geotérmico con circuito abierto típico.

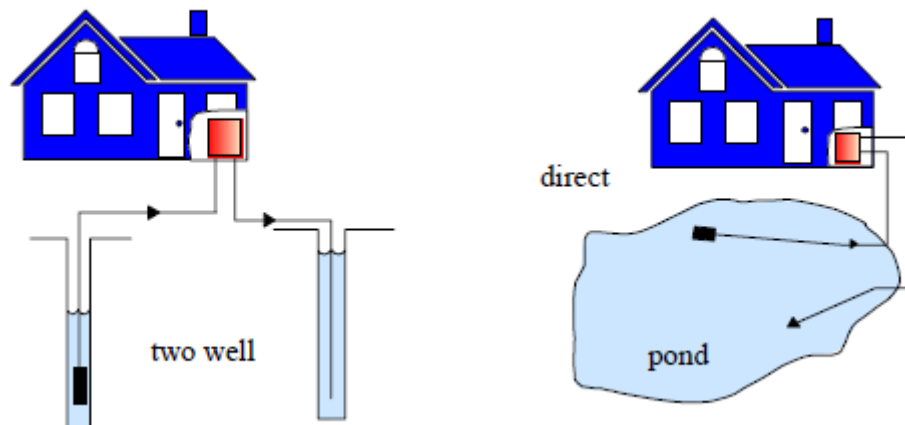


Figura nº54. Esquema de la configuración de un aprovechamiento geotérmico con circuito abierto (Curtis, R., Lund, J., Sanner, B., Rybach, L. & Hellstr 2005).

#### 5.4.2 Aprovechamiento geotérmico (circuito cerrado).

Los aprovechamientos geotérmicos de circuito cerrado consisten en introducir un circuito de tuberías en el subsuelo para que se caliente o enfríe el agua que se encuentra dentro del circuito gracias al gradiente térmico del terreno (Dehkordi, S.E. & Schincariol 2014).

La utilización de agua de mina para un aprovechamiento geotérmico con circuito cerrado podría darse únicamente en los pozos mineros (Pozo Calderón, al noroeste de Villablino, y el Pozo María, en Caboalles de Abajo). La actuación consistiría en introducir un circuito de tuberías dentro de los pozos para que se produzca el intercambio térmico entre el agua del pozo y el agua que circularía por el interior del circuito. Esta red de tuberías constituiría el circuito del evaporador de la bomba de calor, ahorrando de esta manera un intercambiador de calor intermedio con respecto a la configuración de circuito abierto.

En la figura nº55 se puede observar la configuración de un aprovechamiento geotérmico con circuito cerrado típico.



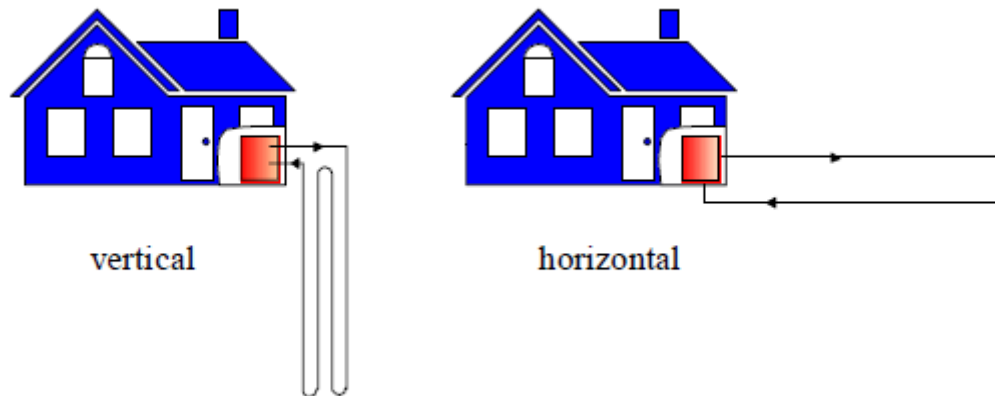


Figura nº55. Distintas configuraciones de geotermia con circuito cerrado (Curtis, R., Lund, J., Sanner, B., Rybach, L. & Hellstr 2005).

#### 5.4.3 Aprovechamiento hidroeléctrico (salto hidroeléctrico).

Los aprovechamientos hidroeléctricos utilizan la energía potencial de una masa de agua situada a una altura determinada. Esta energía potencial se transforma en energía cinética al soltar agua desde una determinada cota y hacerla circular por una red de tuberías hasta una turbina. La turbina transforma la energía cinética del agua en energía eléctrica gracias a un alternador (Deane, J. P., Ó Gallachóir, B. P. & McKeogh 2010).

Para que se pueda realizar este tipo de aprovechamiento es muy importante la existencia de un salto de cota considerable y un caudal mínimo. La magnitud de este salto puede variar según el tipo de turbina a disponer, pero puede ir desde los 20 metros a más de 1.000 metros (Jawahar, C.P. & Prawin 2017).

La diferencia de cota buscada podría darse de dos maneras distintas en el aprovechamiento energético de las aguas de mina del valle Laciana.

- Diferencia de cota entre distintas galerías dentro de los pozos mineros (Pozo Calderón y Pozo María).
- Canalización del agua que sale de las bocaminas estudiadas hasta un entorno adecuado donde se pueda construir una central hidroeléctrica.

#### 5.4.4 Aprovechamiento hidroeléctrico (microturbinas).

Se ha considerado el aprovechamiento hidroeléctrico del agua de las minas abandonadas del valle Laciana por medio de microturbinas. La principal característica de estos equipos es que pueden generar energía eléctrica incorporándose en una conducción o un curso de agua con



un caudal reducido (Dhadwad, A., Balekar, A. & Nagrale 2014). Generan poca electricidad, pero a cambio, amplían las situaciones en las que se puede obtener energía hidroeléctrica, ya que se aplican en casos en los que el caudal circulante no tiene la suficiente entidad como para mover una turbina hidráulica convencional (Jawahar, C.P. & Prawin 2017).

Su utilización puede aplicarse en el aprovechamiento energético del agua de las minas del Valle Laciana porque puede embalsarse el agua que sale de las bocaminas y generar un salto hidroeléctrico de poca altura (5-10 metros).

## 5.5 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS

Para la selección de alternativas se van a evaluar una serie de características que sean comunes en todas las alternativas y que sean efectivas a la hora de cuantificar las distintas alternativas a analizar (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014).

Para ello se van a utilizar dos niveles de comparación cada uno con su factor de ponderación correspondiente. En el primer nivel se encuentran los criterios, los cuáles, representan aspectos comparativos generales que se pueden utilizar para comparar. En el segundo nivel se situarán los subcriterios, que son elementos de comparación particularizados y medibles, es decir, tienen unidades (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

### 5.5.1 Definición de criterios

Hay numerosos autores que han realizado análisis multicriterio para evaluar distintas alternativas energéticas (Bose, D. & Bose 1995; Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014; San-Cristóbal 2011; Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015). En cada uno de estos estudios se han utilizado una serie de criterios comparativos, en función de las elecciones de cada autor. Sin embargo, los estudios de (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015; Strantzali, E. & Aravossis 2016; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009) demuestran que la mayoría de los autores utilizan una serie de criterios y subcriterios determinados por resultar buenos elementos comparativos entre alternativas energéticas. Estos autores coinciden en que la mayoría de los criterios utilizados en la literatura son los siguientes:

- Técnico
- Económico
- Ambiental
- Social



Además de estos criterios se va a utilizar también un criterio funcional para evaluar la viabilidad de implantación de las distintas alternativas en la zona de estudio.

## 5.5.2 Definición de subcriterios

### 5.5.2.1 Establecimiento de subcriterios

Los autores antes mencionados también han definido los subcriterios más utilizados en la bibliografía consultada. En la tabla nº36 se resumen los datos reflejados en los estudios de estos autores:

| Criterio    | Subcriterio                        | (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009) |        | (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015) |        | (Strantzali, E. & Aravossis 2016) |
|-------------|------------------------------------|--|--------|---|--------|-----------------------------------|
|             |                                    | nº   | %      | nº  | %      | %                                 |
| Técnico     | Eficiencia                         | 15   | 40,54% | 14  | 43,75% | 31,00%                            |
|             | Eficiencia de exergía              | 3  | 8,11%  | 2   | 6,25%  | -                                 |
|             | Fiabilidad                         | 9  | 24,32% | -   | -      | 20,00%                            |
|             | Disponibilidad del recurso         | -  | -      | -   | -      | 18,00%                            |
|             | Potencia instalada                 | -  | -      | -   | -      | 17,00%                            |
|             | Madurez                            | 3  | 8,11%  | 11  | 34,38% | 16,00%                            |
|             | Seguridad                          | 9  | 24,32% | -   | -      | 10,00%                            |
|             | Producción de energía              | -  | -      | -   | -      | 9,00%                             |
|             | Demanda                            | -  | -      | -   | -      | 9,00%                             |
|             | Ratio de energía primaria          | 4  | 10,81% | 2   | 6,25%  | 8,00%                             |
|             | Vida útil                          | -  | -      | -   | -      | 8,00%                             |
|             | Continuidad                        | -  | -      | -   | -      | 5,00%                             |
| Estabilidad | -                                  | -  | -      | -   | 3,00%  |                                   |
| Económico   | Coste de inversión                 | 24   | 64,86% | 4   | 12,50% | 52,00%                            |
|             | Coste de operación y mantenimiento | 13   | 35,14% | 5   | 15,63% | 34,00%                            |
|             | Coste de energía                   | 16   | 43,24% | 2   | 6,25%  | 23,00%                            |
|             | Retorno de la inversión            | 4  | 10,81% | -   | -      | 16,00%                            |
|             | IRR                                | -  | -      | -   | -      | 9,00%                             |
|             | LCC                                | -  | -      | -   | -      | 6,00%                             |



|           |                                |    |        |    |        |        |
|-----------|--------------------------------|----|--------|----|--------|--------|
|           | NPV                            | 5  | 13,51% | -  | -      | 5,00%  |
|           | Vida útil                      | 4  | 10,81% | -  | -      | 5,00%  |
|           | Coste anual equivalente        | 4  | 10,81% | -  | -      | 2,00%  |
| Ambiental | Emisión CO <sub>2</sub>        | 21 | 56,76% | -  | -      | 52,00% |
|           | Uso de terreno                 | 10 | 27,03% | -  | -      | 33,00% |
|           | Impacto en ecosistemas         | -  | -      | -  | -      | 31,00% |
|           | Emisión NOx                    | 12 | 32,43% | -  | -      | 22,00% |
|           | Emisión SO <sub>2</sub>        | 8  | 21,62% | -  | -      | 17,00% |
|           | Emisiones (general)            | 6  | 16,22% | 5  | 15,63% | 17,00% |
|           | Ruido                          | 6  | 16,22% | -  | -      | 14,00% |
|           | Emisión de partículas          | 5  | 13,51% | -  | -      | 2,00%  |
| Social    | Creación de puestos de trabajo | 9  | 24,32% | -  | -      | 46,00% |
|           | Impacto a humanos              | -  | -      | 3  | 9,38%  | -      |
|           | Aceptación social              | 4  | 10,81% | -  | -      | 28,00% |
|           | Beneficios sociales            | 5  | 13,51% | -  | -      | 15,00% |
|           | Impacto visual                 | -  | -      | -  | -      | 14,00% |
|           | Desarrollo local               | -  | -      | -  | -      | 13,00% |
|           | Impactos en la salud           | -  | -      | -  | -      | 10,00% |
|           | Beneficios en los trabajos     | -  | -      | -  | -      | 8,00%  |
| TOTAL     |                                | 37 | -      | 32 | -      | -      |

Tabla nº36. Recopilación bibliográfica de subcriterios y pesos asignados.

En los estudios de (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009) y (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015) se presenta la bibliografía recopilada para cada subcriterio o el número total de referencias bibliográficas. Para darle consistencia a la comparación entre el análisis de los tres autores se han expresado todos en porcentaje. Para ello se ha calculado el número total de referencias bibliográficas en ambos estudios y se ha presentado la información como porcentaje. En el estudio de (Strantzali, E. & Aravossis 2016) aparecen reflejados directamente los porcentajes de cada uno de los subcriterios con respecto a la muestra de bibliografía utilizada por el autor.

Según (Strantzali, E. & Aravossis 2016) los subcriterios más utilizados en la bibliografía son la eficiencia, la potencia instalada, el coste de inversión, los costes de mantenimiento y operación, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso del terreno, la creación de puestos de trabajo y la



aceptación social. Estas conclusiones son refrendadas por los estudios de (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009) y (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015) como se puede observar en la tabla nº36.

Para establecer los subcriterios en esta comparación entre tecnologías existentes se ha tenido en cuenta también la disposición de datos sobre las tecnologías a comparar. Se han utilizado los siguiente estudios (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; San-Cristóbal 2011; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014; Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015) como base para tener datos de las tecnologías a comparar, así como la información recogida en el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020 del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía del gobierno de España (IDAE) (IDAE 2011a, 2011b).

Los subcriterios establecidos se recogen en la tabla nº37:

| <b>Criterio</b> | <b>Subcriterio</b>                   |
|-----------------|--------------------------------------|
| Técnico         | Eficiencia                           |
|                 | Potencia instalada (MW)              |
| Económico       | Coste de inversión                   |
|                 | Coste de operación y mantenimiento   |
|                 | Ratio (€/kWh)                        |
|                 | Retorno de la inversión (años)       |
| Ambiental       | Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) |
|                 | Ocupación de terreno                 |
| Social          | Creación de puestos de trabajo       |
|                 | Aceptación social                    |
| Funcional       | Viabilidad de implantación           |

Tabla nº37. Criterios establecidos para el estudio de alternativas.

### 5.5.2.2 Explicación de subcriterios

#### **Eficiencia**

Este subcriterio evalúa la cantidad de energía generada, bien sea eléctrica o térmica, en comparación con la energía que necesita el sistema para la generación (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015; Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015). Se trata del subcriterio técnico más utilizado en análisis multicriterio dentro del sector energético (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009). Normalmente se utiliza el COP



(Coefficient Of Performance) para evaluar la eficiencia de sistemas energéticos cuyo objetivo es proporcionar energía térmica, ya que es la relación entre la energía térmica suministrada y la energía eléctrica consumida para la generación (Harvey 1978). La eficiencia de los sistemas energéticos, cuyo objetivo es obtener energía eléctrica, se obtiene analizando la energía que el sistema puede otorgar idealmente y se compara con la energía que el sistema otorga realmente. Esta fracción es siempre menor que 1 debido a las pérdidas de energía en el proceso de generación. Cuanto mayor sea la eficiencia, mejor será la alternativa evaluada.

### **Potencia instalada**

Se ha tenido en cuenta la potencia instalada en España de los sistemas energéticos analizados (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014). Se considera que, cuanto más potencia instalada haya de una alternativa en concreto, más desarrollada está la tecnología para su implantación y, por tanto, más probabilidad hay de encontrar profesionales que puedan ejecutar la instalación salvando los problemas técnicos que aparezcan.

### **Coste de inversión**

Este subcriterio refleja la inversión necesaria para acometer el inicio de la explotación de un sistema energético en concreto. En este concepto se incluyen las obras necesarias para ejecutar el sistema energético tanto obra civil, como equipos electromecánicos y puesta en marcha (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009). Cuanto mayor sea el coste de la inversión menos atractivo será el proyecto para los inversores y peor valorada estará la alternativa evaluada. Se mide en unidades monetarias.

### **Coste de operación y mantenimiento**

El coste de operación y mantenimiento corresponde al coste de todas las actividades necesarias para mantener en funcionamiento la instalación energética evaluada (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014). Se suele dividir en dos partes, por un lado, los salarios de las personas encargadas de operar la instalación, así como los consumibles habituales de la operación, y por otro lado los materiales, actuaciones y servicios destinados a alargar la vida útil de la instalación (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).



### **Ratio (€/kWh)**

Este ratio refleja el coste de la inversión dividido entre los kWh potenciales que se pueden generar en la instalación. De esta manera se obtiene una medida de la inversión relativa.

### **Retorno de la inversión**

El periodo de retorno de la inversión es el periodo de tiempo necesario para que la actividad económica desarrollada genere unos ahorros o beneficios iguales a la inversión realizada (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009). Es una manera intuitiva que tiene el inversor para evaluar la rapidez con la que se le va a devolver el dinero invertido. Cuanto menor sea este tiempo más atractivo será el proyecto para los inversores.

### **Emisiones de CO<sub>2</sub>**

Se trata de los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por cada sistema energético evaluado para producir un kWh en los términos normales de operación (Chou, J.S. & Ongkowitzo 2014). Cuanto mayor sean las emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas evaluados, menos beneficiosos para el medio ambiente resultan, ya que este gas contribuye entre un 9 y un 26% al efecto invernadero (Kiehl, J.T. & Trenberth 1997). Para evaluar este parámetro es necesario ejecutar un Análisis del Ciclo de Vida de las distintas alternativas y se mide en gCO<sub>2</sub>/kWh.

### **Ocupación de terreno**

La ocupación de terreno evalúa el espacio total del territorio a ocupar por el sistema evaluado. Se mide en km<sup>2</sup>/TWh y cuanto mayor es, menos competitiva es la opción estudiada. Este subcriterio está a caballo entre el criterio ambiental y el social debido a que cuanto más terreno se ocupe mayor será la afección medioambiental del mismo, y mayor será la afección a los propietarios de los terrenos (Beccali, M., Cellura, M. & Mistretta 2003; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

### **Creación de puestos de trabajo**

Los sistemas energéticos crean muchos puestos de trabajo en sus diversas etapas: planificación, construcción, operación y desmantelamiento (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015). Cuanto mayor sea este parámetro mejor vista socialmente va a ser la alternativa estudiada (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009). La unidad de medición empleada para valorar este subcriterio es la ratio persona/MW instalado.



### **Aceptación social**

La aceptación social refleja la opinión de expertos o de los usuarios con relación a la ejecución de un proyecto en particular (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015). Es muy importante ya que la opinión del público puede influir determinantemente en el transcurso de las obras. Se trata de una variable cualitativa ya que no se puede medir directamente a no ser que se realicen encuestas a los vecinos locales (Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009).

### **Viabilidad de implantación**

Se utiliza este subcriterio para evaluar aspectos concretos de los sistemas estudiados que puedan afectar gravemente a la culminación de las obras.

#### **5.5.3 Ponderación de criterios y subcriterios**

Para la ponderación de criterios y subcriterios se va a utilizar la metodología del procedimiento jerárquico analítico (AHP) en la que se comparan cada uno de los criterios y subcriterios entre sí para ver su importancia relativa (Bose, D. & Bose 1995; Kablan 2004).

Cada uno de los elementos en los dos niveles considerados va a ser ponderado relativamente con los elementos de su nivel, de manera que la ponderación de los criterios afectará a su vez a la ponderación final de los subcriterios. Se distinguen por lo tanto tres coeficientes:

- CPc: Coeficiente de ponderación relativo de los criterios.
- CPs: Coeficiente de ponderación relativo de los subcriterios.
- CPa: Coeficiente de ponderación absoluto.

Los diversos coeficientes de ponderación se relacionan de la siguiente manera:

$$CPa = CPc \cdot CPs$$

##### **5.5.3.1 Ponderación de criterios**

Es necesario asignar a cada uno de los criterios seleccionados una valoración en función de su importancia, categorizándolos en tres grupos distintos:

- Muy relevantes: se le asigna una valoración de 3.
- Relevantes: se le asigna una valoración de 2.
- Poco relevantes: se le asigna una valoración de 1.





En la tabla nº38 se muestra la asignación de los distintos criterios en función de su importancia.

| Criterio  | Puntuación |
|-----------|------------|
| Técnico   | 2          |
| Económico | 3          |
| Ambiental | 2          |
| Social    | 1          |
| Funcional | 3          |

Tabla nº38. Categorización de criterios.

La asignación de esta puntuación es original del autor de la tesis y se justifica de la siguiente manera:

- Criterio técnico: se considera un criterio relevante pero no crítico, ya que no pone en riesgo la viabilidad de la actuación.
- Criterio económico: se considera un criterio muy relevante ya que puede desembocar en la desestimación de la ejecución de la actuación por no considerarse competitivo para ningún promotor.
- Criterio ambiental: se considera un criterio relevante pero no crítico, ya que no pone en riesgo la viabilidad de la actuación.
- Criterio social: se considera un criterio poco relevante por su dificultad a la hora de ser medido y por la poca afección que tiene en la ejecución de la actuación.
- Criterio funcional: se considera un criterio muy relevante ya que puede desembocar en la desestimación de la ejecución de la actuación por haber algún problema grave en la implantación del aprovechamiento energético. Además, en este criterio se recoge el conocimiento específico del área de estudio que se reflejó en el capítulo III.

La asignación de ponderación de cada criterio se consigue comparando todos los criterios por parejas. De esta manera se conforma una matriz NxN que se bautiza con el nombre de Aij, en este caso 5x5 ya que tenemos 5 criterios, que refleja los resultados de la comparación por pares. Por ejemplo, si se están comparando los criterios técnico y económico, con valores de categorización 2 y 3 respectivamente, los valores de la matriz serán los siguientes:

$$\text{Valor comparación técnico} - \text{económico} = \frac{2}{3} = 0,67$$

$$\text{Valor comparación económico} - \text{técnico} = \frac{3}{2} = 1,5$$



Siguiendo este modelo se comparan por pares todos los criterios. Dando lugar a la matriz recogida en la tabla nº39:

|           | Técnico | Económico | Ambiental | Social | Funcional |
|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
| Técnico   | 1,00    | 0,67      | 1,00      | 2,00   | 0,67      |
| Económico | 1,50    | 1,00      | 1,50      | 3,00   | 1,00      |
| Ambiental | 1,00    | 0,67      | 1,00      | 2,00   | 0,67      |
| Social    | 0,50    | 0,33      | 0,50      | 1,00   | 0,33      |
| Funcional | 1,50    | 1,00      | 1,50      | 3,00   | 1,00      |

Tabla nº39. Matriz de comparación por pares de criterios (Aij)

Para obtener los CPc se obtiene otra matriz 5x5 (Bij) cuyos valores son los valores de la matriz Aij divididos entre la suma de sus columnas, es decir:

$$b_{11} = \frac{a_{11}}{a_{11} + a_{21} + a_{31} + a_{41} + a_{51}} = \frac{1}{1 + 1,5 + 1 + 0,5 + 1,5} = 0,18$$

A continuación, se muestra la matriz Bij, recogida en la tabla nº40:

|      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |

Tabla nº40. Matriz Bij de criterios.

El vector de prioridad, que en este caso representa los coeficientes de ponderación de los criterios (CPc), es la media de las filas de la matriz Bij, y se muestra en la tabla nº41.

| Criterio  | CPc  |
|-----------|------|
| Técnico   | 0,18 |
| Económico | 0,27 |
| Ambiental | 0,18 |
| Social    | 0,09 |
| Funcional | 0,27 |

Tabla nº41. Coeficientes de Ponderación de los criterios (CPc)



### 5.5.3.2 Comprobación de la consistencia de la matriz

Se hace esta comprobación para ver si las decisiones que se han tomado a la hora de definir la matriz Aij son consistentes, es decir, tienen validez. Puede ser que en la toma de decisiones no guarde una coherencia entre las distintas combinaciones por pares, por ello es preciso realizar esta comprobación.

Las comparaciones por pares son consistentes si se cumple la siguiente condición (Saaty 1980; Kablan 2004):

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik} \quad \text{para } i, j, k = 1, 2, \dots, n$$

Siendo  $a_{ij}$  el valor de la matriz Aij que se encuentra en la fila i y en la columna j.

Para hacer esta comprobación se realizan los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se calcula el valor medio del autovector principal de la matriz Aij ( $\lambda_{max}$ ).
2. Posteriormente se calcula el Índice de Consistencia (CI) definido por (Saaty 1980) como sigue:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

3. Por último, se halla el Ratio de Consistencia (CR) que es un ratio definido por (Saaty 1980) que estima la relación que existe entre una determinada matriz y una matriz puramente aleatoria, en términos de su consistencia. Si CR es menor que el 10% entonces la elaboración de la matriz Aij se considera correcta, en caso contrario, se deberán revisar las decisiones tomadas para su elaboración.

$$CR = CI/RI$$

Siendo RI el Índice de aleatoriedad calculado por (Saaty 1980) y que se recoge en la tabla nº42:

| Tamaño de la matriz (N)     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Índice de aleatoriedad (RI) | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Tabla nº42. Índice de aleatoriedad medio para cada tamaño de matriz (Saaty 1980; Kablan 2004)

Para calcular el valor medio de  $\lambda_{max}$  se procede como sigue (Saaty 1980; Kablan 2004):

1. Se multiplica la matriz Aij por el vector de prioridad asociado (Vp), obteniendo el vector V.
2. Se cumple que:

$$[V] = \lambda_{max} [V_p]$$



Se va a realizar este proceso para comprobar la consistencia de la matriz Aij de la ponderación de los criterios:

|      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,00 | 0,67 | 1,00 | 2,00 | 0,67 | 0,18 | 0,91 |
| 1,50 | 1,00 | 1,50 | 3,00 | 1,00 | 0,27 | 1,36 |
| 1,00 | 0,67 | 1,00 | 2,00 | 0,67 | 0,18 | 0,91 |
| 0,50 | 0,33 | 0,50 | 1,00 | 0,33 | 0,09 | 0,45 |
| 1,50 | 1,00 | 1,50 | 3,00 | 1,00 | 0,27 | 1,36 |

$$\begin{array}{|c|} \hline 0,91 \\ \hline 1,36 \\ \hline 0,91 \\ \hline 0,45 \\ \hline 1,36 \\ \hline \end{array} = \lambda_{max} \begin{array}{|c|} \hline 0,18 \\ \hline 0,27 \\ \hline 0,18 \\ \hline 0,09 \\ \hline 0,27 \\ \hline \end{array}$$

$$\lambda_{max} = \frac{\left(\frac{0,91}{0,18}\right) + \left(\frac{1,36}{0,27}\right) + \left(\frac{0,91}{0,18}\right) + \left(\frac{0,45}{0,09}\right) + \left(\frac{1,36}{0,27}\right)}{5} = 5$$

A continuación, nos disponemos a hallar el Índice de Consistencia (CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5 - 5}{5 - 1} = 0$$

Al ser el Índice de consistencia (CI) igual a 0, el Ratio de consistencia (CR) va a ser también 0 y en consecuencia menor que 10%, por lo tanto, la matriz Aij es consistente.

Se ha observado que este hecho se repite siempre que la matriz Bij tiene todos los valores de una fila iguales, y, por tanto, se puede determinar si la matriz Aij es consistente únicamente hallando Bij, lo cual agiliza los cálculos. De ahora en adelante se asumirá que, si la matriz Bij tiene todos los elementos de una fila iguales, la matriz Aij es consistente.

### 5.5.3.3 Ponderación de subcriterios

Se ha seguido la misma metodología para obtener los Coeficientes de Ponderación relativos a los subcriterios (CPs). Se le ha asignado a cada uno de los subcriterios establecidos una valoración en función de su importancia, categorizándolos en tres grupos distintos:

- Muy relevantes: se le asigna una valoración de 3.



- Relevantes: se le asigna una valoración de 2.
- Poco relevantes: se le asigna una valoración de 1.

En la tabla nº43 se puede ver la categorización de los subcriterios:

| <b>Criterio</b> | <b>Subcriterio</b>                   | <b>Puntuación</b> |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| Técnico         | Eficiencia                           | 2                 |
|                 | Potencia instalada (MW)              | 1                 |
| Económico       | Coste de inversión                   | 2                 |
|                 | Coste de operación y mantenimiento   | 1                 |
|                 | Ratio (€/kWh)                        | 2                 |
|                 | Retorno de la inversión (años)       | 3                 |
| Ambiental       | Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) | 2                 |
|                 | Uso del terreno                      | 1                 |
| Social          | Creación de puestos de trabajo       | 2                 |
|                 | Aceptación social                    | 2                 |
| Funcional       | Viabilidad de implantación           | 3                 |

Tabla nº43. Categorización de subcriterios.

La asignación de esta puntuación es original del autor de la tesis y se justifica de la siguiente manera:

- Subcriterio Eficiencia: se considera el subcriterio más relevante dentro del criterio técnico de las alternativas energéticas. No obstante, no se considera crítico para la ejecución del aprovechamiento y por ello no se le da la ponderación de 3.
- Subcriterio Potencia instalada (MW): de entre los subcriterios técnicos se considera que es el menos relevante.
- Subcriterio Coste de inversión: de entre los subcriterios económicos no es el más relevante, se pretende dar un mayor peso al retorno de la inversión.
- Subcriterio Coste de operación y mantenimiento: de entre los subcriterios económicos se considera el menos relevante de cara a un posible promotor, por ello, se le da la menor ponderación.
- Subcriterio Ratio (€/kWh): se considera que tiene una relevancia similar al coste de inversión e inferior al periodo de retorno de la inversión, por ello, se le da una ponderación intermedia.



- Subcriterio Retorno de la inversión: se considera el subcriterio económico más relevante a la hora de realizar una inversión, por ello, se le asigna la ponderación máxima.
- Subcriterio Emisiones de CO<sub>2</sub>: se considera como el subcriterio más relevante de entre los subcriterios ambientales, sin embargo, no se considera crítico para la ejecución del aprovechamiento energético.
- Subcriterio Uso del terreno: de entre los subcriterios ambientales se considera que es el menos relevante.
- Subcriterio Creación de puestos de trabajo: los dos criterios sociales se considera que tienen la misma relevancia y se les da una ponderación intermedia para compensar la baja ponderación que se le ha dado al criterio.
- Subcriterio Aceptación social: se considera que tiene la misma relevancia que el otro criterio social y se le da una ponderación intermedia para compensar la baja ponderación que se le ha dado al criterio.
- Subcriterio Viabilidad de implantación: se considera un subcriterio crítico para la implantación del aprovechamiento energético, por eso se le da la máxima ponderación.

Al haber establecido un total de once (11) subcriterios, la matriz de ponderación de subcriterios será de 11x11. Se muestran a continuación las matrices A<sub>ij</sub> (tabla nº44) y B<sub>ij</sub> (tabla nº45) correspondientes a la evaluación de subcriterios.

En la tabla nº44 se han utilizado abreviaturas para referirse a los distintos subcriterios:

- Eficiencia (E)
- Potencia instalada en MW (P)
- Coste de inversión (C)
- Coste de operación y mantenimiento (COM)
- Ratio (€/kWh)
- Retorno de la inversión en años (RI)
- Emisiones de CO<sub>2</sub> en g/kWh (CO<sub>2</sub>)
- Uso del terreno (Uso)
- Creación de puestos de trabajo (T)
- Aceptación social (A)
- Viabilidad de implantación (V)



|  | E    | P    | C    | COM  | (€/kWh) | RI   | CO2 (gr/kWh) | Uso  | T    | A    | V    |
|--|------|------|------|------|---------|------|--------------|------|------|------|------|
| <b>Eficiencia</b>                          | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Potencia instalada (MW)</b>             | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 1,00 | 0,50    | 0,33 | 0,50         | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,33 |
| <b>Coste de inversión</b>                  | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Coste de operación y mantenimiento</b>  | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 1,00 | 0,50    | 0,33 | 0,50         | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,33 |
| <b>Ratio (€/kWh)</b>                       | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Retorno de la inversión (años)</b>      | 1,50 | 3,00 | 1,50 | 3,00 | 1,50    | 1,00 | 1,50         | 3,00 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |
| <b>Emisiones de CO<sub>2</sub> (g/kWh)</b> | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Uso del terreno</b>                     | 0,50 | 1,00 | 0,50 | 1,00 | 0,50    | 0,33 | 0,50         | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,33 |
| <b>Creación de puestos de trabajo</b>      | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Aceptación social</b>                   | 1,00 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 1,00    | 0,67 | 1,00         | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,67 |
| <b>Viabilidad de implantación</b>          | 1,50 | 3,00 | 1,50 | 3,00 | 1,50    | 1,00 | 1,50         | 3,00 | 1,50 | 1,50 | 1,00 |

Tabla nº44. Categorización de subcriterios (Aij).



|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |

Tabla nº45. Matriz Bij de criterios.





El vector de prioridad, el cual representa los coeficientes de ponderación de los subcriterios (CPs), es la media de las filas de la matriz  $B_{ij}$  y se presenta en la tabla nº46.

| <b>Subcriterio</b>                   | <b>CPs</b> |
|--------------------------------------|------------|
| Eficiencia                           | 0,10       |
| Potencia instalada (MW)              | 0,05       |
| Coste de inversión                   | 0,10       |
| Coste de operación y mantenimiento   | 0,05       |
| Ratio (€/kWh)                        | 0,10       |
| Retorno de la inversión (años)       | 0,14       |
| Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) | 0,10       |
| Uso del terreno                      | 0,05       |
| Creación de puestos de trabajo       | 0,10       |
| Aceptación social                    | 0,10       |
| Viabilidad de implantación           | 0,14       |

Tabla nº46. Coeficientes de Ponderación de los subcriterios (CPs)

#### **5.5.3.4** *Coeficientes de ponderación absolutos*

Como se ha comentado anteriormente, los Coeficientes de ponderación absolutos (CPa) son la multiplicación de los Coeficientes de ponderación relativos de los criterios (CPC) por los Coeficientes de ponderación relativos de los subcriterios (CPs). En la tabla nº47 se pueden observar los CPa:



| <b>Criterio</b> | <b>Subcriterio</b>                   | <b>CPc</b> | <b>CPs</b> | <b>Cpa</b> | <b>Cpa norm</b> |
|-----------------|--------------------------------------|------------|------------|------------|-----------------|
| Técnico         | Eficiencia                           | 0,18       | 0,10       | 0,02       | <b>0,08</b>     |
|                 | Potencia instalada (MW)              | 0,18       | 0,05       | 0,01       | <b>0,04</b>     |
| Económico       | Coste de inversión                   | 0,27       | 0,10       | 0,03       | <b>0,12</b>     |
|                 | Coste de operación y mantenimiento   | 0,27       | 0,05       | 0,01       | <b>0,06</b>     |
|                 | Ratio (€/kWh)                        | 0,27       | 0,10       | 0,03       | <b>0,12</b>     |
|                 | Retorno de la inversión (años)       | 0,27       | 0,14       | 0,04       | <b>0,19</b>     |
| Ambiental       | Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) | 0,18       | 0,10       | 0,02       | <b>0,08</b>     |
|                 | Uso del terreno                      | 0,18       | 0,05       | 0,01       | <b>0,04</b>     |
| Social          | Creación de puestos de trabajo       | 0,09       | 0,10       | 0,01       | <b>0,04</b>     |
|                 | Aceptación social                    | 0,09       | 0,10       | 0,01       | <b>0,04</b>     |
| Funcional       | Viabilidad de implantación           | 0,27       | 0,14       | 0,04       | <b>0,19</b>     |

Tabla nº47. Coeficientes de ponderación absolutos.

En la columna “CPa norm” se encuentran los CPa normalizados, representando los mismos en tanto por uno.

## 5.6 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA MÁS VENTAJOSA

### 5.6.1 Discusión de valores de subcriterios

En el presente apartado se va a justificar la valoración de cada una de las alternativas con respecto a los subcriterios establecidos.

#### 5.6.1.1 Eficiencia

La eficiencia depende del objetivo de la tecnología utilizada. En este análisis se pretenden comparar tecnologías con objetivos distintos, por un lado, las tecnologías geotérmicas tienen como objetivo la generación de calor, mientras que las tecnologías hidroeléctricas tienen como fin obtener electricidad.

Para salvar este problema y poder utilizar este subcriterio de comparación se va a utilizar la eficiencia de la geotermia como generador eléctrico, aunque no sea específicamente el fin de la alternativa a estudiar. En este sentido, (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) compararon la eficiencia en la producción de electricidad de diversas energías renovables, entre ellas la hidroelectricidad y la geotermia. Tras realizar una recopilación bibliográfica extensa



concluyeron que la eficiencia de la producción eléctrica de la geotermia es de entre el 10 y el 20% mientras que la eficiencia de la hidroelectricidad es superior al 90%.

Teniendo en cuenta la comparación que hicieron (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) de la geotermia y la hidroelectricidad, se ha ampliado el concepto de eficiencia en geotermia para poder comparar las disposiciones de circuito abierto y circuito cerrado. Una de las ventajas más importantes de los circuitos geotérmicos abiertos es que la fuente de agua se mantiene a la misma temperatura durante todo el año (Self, S.J., Reddy, B.V. & Rosen 2013; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017). Sin embargo, la calidad de las aguas utilizadas es determinante pudiendo afectar gravemente a la eficiencia del sistema ocasionando incrustaciones o corrosiones (Dowlatabadi, H. & Hanova 2007).

De esta manera, se considera que la eficacia de los sistemas con circuito abierto y circuito cerrado tienen una eficiencia similar (Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017). Antes de 2010 un COP (Coefficient of Performance) de 3,5 era considerado aceptable, mientras que ahora son cada vez más comunes los COP de entre 4 y 5 (Boissavy 2015).

Por otro lado, la generación eléctrica mediante microturbinas tiene una eficiencia elevada si se compara con la generación eléctrica de la geotermia, pero no llega a los valores de la energía hidroeléctrica convencional. Según (Jawahar, C.P. & Prawin 2017) la gran mayoría de microturbinas, cuya potencia no supera los 100 kW, tienen una eficiencia de entre el 60 y el 90%.

En la tabla nº48 se pueden observar los valores de eficiencia de cada una de las alternativas analizadas:

|                                   | <b>Eficiencia</b> | <b>Referencia</b>  |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 10%-20%           | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 10%-20%           | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 90%               | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009)                                  |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 60%-90%           | (Jawahar, C.P. & Prawin 2017)  |

Tabla nº48. Comparativa de la eficiencia de los sistemas analizados.



### 5.6.1.2 Potencia instalada

Se ha consultado el Resumen del Plan de Energías Renovables 2011-2020 del Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía del Gobierno de España (IDAE 2011b). Este documento es la fuente de consulta de datos energéticos más fiable debido a que se trata de un documento oficial aprobado por el Consejo de Ministros de España en 2011. Se encuentran recogidos en el mismo las prognosis de evolución de la energía en España hasta 2020 y las rutas a seguir en la política energética. Según este documento los objetivos para 2020 estaban establecidos en 1.917 MW de potencia instalada de generación hidráulica entre 1W y 10 MW sin bombeo. Esto corresponde a una generación bruta sin normalizar de 5.749 GWh. Por otro lado, las estimaciones de potencia instalada de aprovechamiento geotérmico mediante bombas de calor en el documento (IDAE 2011b) para 2020 era de 40,5 ktep, lo que equivale a 469,8 MWh de generación.

Se considera que el objetivo de generación térmica con bomba de calor a través de geotermia se consigue la mitad con la distribución de circuito cerrado y la otra mitad con la distribución de circuito abierto, de esta manera, se obtiene una energía generada objetivo de 234,9 MWh con cada uno de los sistemas geotérmicos analizados.

Por último, el documento no hace mención expresa a energía con microturbinas por ser una tecnología en fase de desarrollo, por lo tanto, se va a considerar una potencia instalada y una energía generada en 2020 muy pequeña.

En la tabla nº49 se puede ver el resumen de lo recopilado en este apartado:

|                                   | Potencia prevista | Energía generada | Referencia   |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|--------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | -                 | 234,9 MWh        | (IDAE 2011b) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | -                 | 234,9 MWh        | (IDAE 2011b) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 1917 MW           | 5,749 GWh        | (IDAE 2011b) |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | -                 | -                | -            |

Tabla nº49. Potencia instalada y energía generada de los sistemas analizados.

### 5.6.1.3 Coste de inversión

Se tiene en cuenta este subcriterio para estimar la inversión inicial que tendría que hacer un posible inversor en cada una de las tecnologías estudiadas.

Se han buscado referencias bibliográficas que den estimaciones razonables sobre la inversión inicial a llevar a cabo en cada una de las alternativas planteadas. San Cristóbal (San-Cristóbal



2011) estima la inversión inicial de una central hidroeléctrica de 10 MW de potencia instalada en España en 15.000.000 €.

Por su parte, Hulleras del Norte, S.A. ha sido la promotora de varios proyectos de aprovechamiento del calor de agua de minas abandonadas para ejecutar una red de calor, muy similares a la alternativa de geotermia con disposición en circuito abierto planteada en este estudio. Algunos de estos proyectos han sido la ejecución de District Heating Geotérmico con agua de mina a diferentes edificios del entorno del pozo Barredo en Mieres (Asturias), con un valor estimado del contrato de 1.322.621,14 € (Fernández 2018), y la construcción de una red de calor a diferentes edificios en el entorno del pozo Fondón en Langreo, con un valor estimado del contrato de 2.609.905,12 € (García-Carro, F.M. & Solís 2019). (Boissavy 2015) ha estimado la inversión inicial de proyectos geotérmicos en Francia tanto de circuito abierto como de circuito cerrado en torno a 1.540.000 € para sistemas de 1,2 MW de potencia instalada. Estos valores están en consonancia con los reflejados por HUNOSA en la promoción de sus obras. Sin embargo, (Self, S.J., Reddy, B.V. & Rosen 2013) argumentan que los sistemas geotérmicos de circuito abierto requieren menos inversión inicial que los de circuito cerrado debido a que conllevan menos perforación y un diseño más sencillo.

El estudio de (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009) refleja unos costes iniciales en el entorno de los 100.000 € para microturbinas hidráulicas de 30 kW, reflejados en la figura nº56:

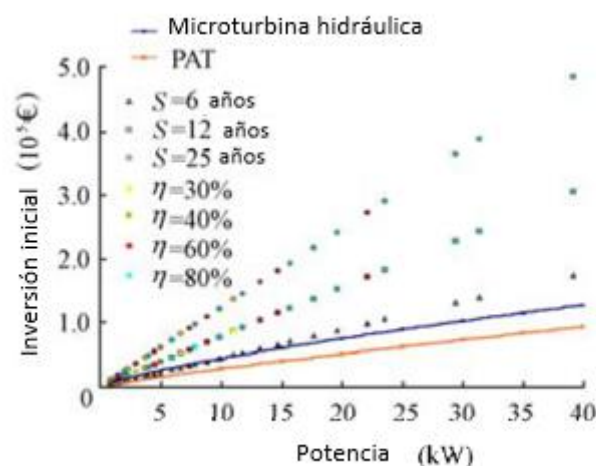


Figura nº56. Coste de inversión en microturbinas hidráulicas. Adaptado de (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009).

En la tabla nº50 se reflejan las conclusiones de este apartado:



|                                      | <b>Inversión inicial</b> | <b>Bibliografía</b>  |
|--------------------------------------|--------------------------|--|
| Geotermia<br>(Circuito abierto)      | 1.540.000,00 €           | (Boissavy 2015; Fernández 2018; García-Carro, F.M. & Solís 2019) |
| Geotermia<br>(Circuito cerrado)      | 1.540.000,00 €           | (Boissavy 2015; Fernández 2018; García-Carro, F.M. & Solís 2019) |
| Hidroelectricidad<br>(convencional)  | 15.000.000,00 €          | (San-Cristóbal 2011)   |
| Hidroelectricidad<br>(microturbinas) | 100.000,00 €             | (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009)                            |

Tabla nº50. Inversión inicial de los sistemas analizados.

#### 5.6.1.4 Coste de operación y mantenimiento

Se han encontrado valores discordantes en la bibliografía consultada, por ello se ha reducido en gran medida el peso de la ponderación de este subcriterio en la valoración de las alternativas. (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) mantiene que los costes de operación de un aprovechamiento geotérmico en EEUU están en torno a los 2,29 centavos de dólar por kWh mientras que en un aprovechamiento hidroeléctrico estarían en torno a los 3 centavos de dólar por kWh. (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015) estimaron los costes de operación de un aprovechamiento geotérmico en Turquía en 0,003 centavos de dólar por kWh y los de los aprovechamientos hidroeléctricos del país en 0,5 centavos de dólar por kWh. Por otro lado, (San-Cristóbal 2011) estimó los costes de operación de una central hidroeléctrica con una potencia instalada inferior a 10 MW en 1,45 €/kWh. Se van a considerar como válidos los valores señalados por (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) por considerarse los más realistas.

Por otro lado, (Boissavy 2015) mantiene que los costes de operación y mantenimiento en aprovechamientos geotérmicos con disposiciones en circuito cerrado y abierto son similares.

Para acabar, en el caso de las microturbinas, (Davis, M.W., Ieee, F., Gifford, A.H., Asme, M. & Krupa 1999) consideraron como costes de operación de una miniturbina de gas unos 0,5 centavos de dólar por kWh.

En la tabla nº51 se puede ver el resumen de los valores recogidos en este apartado:



|                                   | <b>Coste de operación</b> | <b>Bibliografía</b>   |
|-----------------------------------|---------------------------|---|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 2,29 cent/kWh             | (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014)                               |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 2,29 cent/kWh             | (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014)                               |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 3 cent/kWh                | (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014)                               |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,5 cent/kWh              | (Davis, M.W., Ieee, F., Gifford, A.H., Asme, M. & Krupa 1999) |

Tabla nº51. Coste de operación comparativo de los sistemas analizados.

#### 5.6.1.5 Ratio (€/kWh)

(Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) determinaron que el ratio €/kWh en los aprovechamientos geotérmicos era de 0,07 \$/kWh mientras que en los aprovechamientos hidroeléctricos era de 0,05 \$/kWh. Llegaron a esta conclusión tras elaborar una extensa recopilación bibliográfica en la que estudiaron los costes de estos sistemas de generación en todo su ciclo de vida, desde la construcción hasta el desmantelamiento de la misma. Por otro lado, (Clauser, C. & Ewert 2018) refleja los datos del International Renewable Energy Agency (IRENA 2015) en los que se estiman los costes de los aprovechamientos geotérmicos en toda su vida útil en 0,08 \$/kWh, equivalente a 0,09 €/kWh (datos de 2020) mientras que los costes de los aprovechamientos hidroeléctricos se estiman en 0,112 \$/kWh. Los datos de (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) e (IRENA 2015) son congruentes y, por lo tanto, se consideran válidos. Se va a considerar para las microturbinas el mismo ratio que para la hidroelectricidad convencional tomando los valores de (IRENA 2015) como válidos.

En la tabla nº52 se pueden ver los valores considerados del ratio €/kWh para cada una de las tecnologías estudiadas:

|                                   | <b>Ratio €/kWh</b> | <b>Referencia</b> |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,09 €/kWh         | (IRENA 2015)      |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,09 €/kWh         | (IRENA 2015)      |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,112 €/kWh        | (IRENA 2015)      |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,112 €/kWh        | (IRENA 2015)      |

Tabla nº52. Ratio €/kWh de los sistemas analizados.



### 5.6.1.6 Retorno de la inversión

Este subcriterio refleja cuándo recuperaría su dinero un posible inversor. Hay varios autores que han comparado los periodos de retorno de la inversión de proyectos geotérmicos e hidroeléctricos. (Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D. & Yang 2015) recoge de (Kenny, R., Law, C. & Pearce 2010) los periodos de retorno de aprovechamientos geotérmicos e hidroeléctricos correspondiendo a 5,7 años y 11,8 años respectivamente. (Sengül, Ü., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015) elaboraron un estudio sobre las energías renovables de su país, Turquía, en el que establecieron que el periodo de retorno de la inversión de proyectos geotérmicos estaba en torno a 1,5 años mientras que en los proyectos hidroeléctricos el periodo de retorno de la inversión asciende a 5 años. Como se puede observar, las estimaciones de (Kenny, R., Law, C. & Pearce 2010) son bastante más conservadoras que las de (Sengül, Ü., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015). Estas estimaciones dependen de muchos factores, siendo uno de los más determinantes el desarrollo y economía del país de estudio. Turquía y Canadá tienen grandes diferencias económicas y sociales, y por ello, puede ser que el retorno de la inversión en Turquía sea bastante menor que en Canadá debido al abaratamiento de costes de materiales y personal en las obras de construcción de los sistemas energéticos. Por lo tanto, se consideran válidas las dos estimaciones. El periodo de retorno de la inversión de este tipo de iniciativas en España será más parecido al mostrado en Canadá, debido a que la socioeconomía de España y Canadá son más parecidas que la socioeconomía de España y Turquía (Expansión 2020).

(Boissavy 2015) hizo un estudio económico sobre el coste y el retorno de la inversión de los sistemas geotérmicos en Francia y concluyó que, para edificios comerciales, el retorno de la inversión de los sistemas energéticos basados en geotermia con disposición de circuito cerrado es de 18 años, mientras que los sistemas de circuito abierto obtienen el retorno de la inversión en 12 años.

Por su parte, (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009) establecieron el retorno de la inversión de microturbinas hidráulicas entre 6 y 12 años concluyendo que las microturbinas deben tener una potencia instalada de al menos 10 kW para alcanzar retornos de la inversión aceptables.

Las grandes discrepancias entre la bibliografía consultada hacen que se tomen los datos de forma relativa. Del estudio de (Kenny, R., Law, C. & Pearce 2010), se observa que el periodo de retorno de la geotermia es aproximadamente la mitad que el de la hidroelectricidad. Del estudio de (Boissavy 2015) se extrae que el retorno de la inversión de sistemas geotérmicos con circuito abierto es el 67% que el de sistemas geotérmicos con circuito cerrado. Por último,





de (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009) se extrae que el retorno de la inversión de las microturbinas es similar al periodo de retorno de la geotermia con circuito abierto.

Del estudio bibliográfico desarrollado se extraen las conclusiones recogidas en la tabla nº53:

|                                   | <b>Retorno de la inversión</b> | <b>Referencia</b>                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 12 años                        | (Boissavy 2015)                                   |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 18 años                        | (Boissavy 2015)                                   |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 24 años                        | (Kenny, R., Law, C. & Pearce 2010; Boissavy 2015) |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 12 años                        | (Ramos, H.M., Borga, A. & Simão 2009)             |

Tabla nº53. Retorno de la inversión de los sistemas analizados.

#### **5.6.1.7 Emisiones de CO<sub>2</sub>**

Este subcriterio es el aspecto ambiental más importante y se mide en gCO<sub>2</sub> equivalentes por kWh. Se tiene en cuenta toda la vida útil de los sistemas energéticos, desde los estudios previos hasta el desmantelamiento de las plantas (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009). En el estudio bibliográfico de (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) se concluye que los sistemas geotérmicos emiten 170 gCO<sub>2</sub>/kWh mientras que en las plantas hidroeléctricas se emiten 41 gCO<sub>2</sub>/kWh. Estos valores son refrendados y utilizados en los estudios de (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) y (Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D. & Yang 2015) entre otros. Sin embargo, (Rule, B.M., Worth, Z.I. & Boyle 2009) estiman las emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas analizados en 5,6 gCO<sub>2</sub>/kWh y en 4,6 gCO<sub>2</sub>/kWh respectivamente. Se van a considerar las estimaciones de (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) como válidas debido a que se han encontrado repetidamente en la bibliografía consultada.

(Boahen, S., Lee, K.H. & Cho 2017) llevaron a cabo un extenso estudio sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas geotérmicos con bomba de calor concluyendo que depende mucho de dónde se considere que viene la energía eléctrica para que funcionen las bombas de calor. Otras de las conclusiones interesantes de este estudio es que los sistemas con circuito abierto emiten un 28% menos de gCO<sub>2</sub>/kWh que los de circuito cerrado cuando el sistema se opera únicamente para refrigeración, y un 6% menos cuando el sistema se utiliza como refrigeración y como calefacción.



Por último, no se han encontrado referencias expresas sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en sistema que utilicen microturbinas hidráulicas. Se va a estimar que sus emisiones son similares a la de la hidroelectricidad convencional.

En la tabla n°54 se resumen los datos recogidos en este apartado:

|                                   | <b>Emisiones de CO<sub>2</sub></b> | <b>Referencia</b>  |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 160 gCO <sub>2</sub> /kWh          | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 170 gCO <sub>2</sub> /kWh          | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 41 gCO <sub>2</sub> /kWh           | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009)                                  |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 41 gCO <sub>2</sub> /kWh           | -  |

Tabla n°54. Emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas analizados.

#### 5.6.1.8 *Uso del terreno*

El uso del terreno de las diversas tecnologías comparadas depende mucho de la topografía local (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009). Evrendilek y Ertekin consideran un requerimiento genérico de 750 km<sup>2</sup>/TWh en los sistemas hidroeléctricos (Evrendilek, F. & Ertekin 2003). Por su parte, (Gagnon, L. & Van-de-Vate 1997) consideran que el requerimiento genérico de terreno es suficiente con 73 km<sup>2</sup>/TWh.

Los sistemas geotérmicos ocupan menos terreno por tener la mayoría de sus elementos bajo tierra. Sin embargo, también se suelen considerar los terrenos afectados por el sistema geotérmico como con riesgo de subsidencia. Un uso del terreno típico es de entre 18 y 74 km<sup>2</sup>/TWh (Bertani 2005).

Estos valores son coherentes con lo expresado por (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014), que consideran que la geotermia ocupa 46 km<sup>2</sup>/TWh y la hidroelectricidad 75 km<sup>2</sup>/TWh. También están en consonancia los valores estimados por (Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D. & Yang 2015) que consideran para la geotermia un uso del terreno de entre 18 y 74 km<sup>2</sup>/TWh y para la hidroelectricidad unos valores de entre 73 y 750 km<sup>2</sup>/TWh.

No se han encontrado referencias bibliográficas al uso del terreno según las diferentes disposiciones de circuito (abierto o cerrado), por lo tanto, se consideran que tienen el mismo



uso de terreno. Tampoco se han encontrado referencias a los sistemas de microturbinas, pero se considera un mínimo de 10 km<sup>2</sup>/TWh.

En la tabla n°55 se recoge el resumen de los datos analizados en este apartado:

|                                   | <b>Uso del terreno</b>      | <b>Referencia</b>  |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 18-74 km <sup>2</sup> /TWh  | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 18-74 km <sup>2</sup> /TWh  | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Boahen, S., Lee, K.H., Cho 2017) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 73-750 km <sup>2</sup> /TWh | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009)                                  |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 10 km <sup>2</sup> /TWh     | -  |

Tabla n°55. Uso del terreno de los sistemas analizados.

#### 5.6.1.9 Creación de puestos de trabajo

Se han encontrado dos referencias bibliográficas para este subcriterio. (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) en su un estudio sobre la energía renovable en Taiwán estimaron que los puestos de trabajo creados por los sistemas energéticos geotérmicos e hidroeléctricos son de 595.100 personas y 1.752.000 personas, respectivamente. Sin embargo, no especifican si estos valores son a nivel mundial o a nivel nacional.

(Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015) establecen que los puestos de trabajo creados por los sistemas energéticos geotérmico e hidroeléctrico en Turquía son entre 0,1 y 0,33 personas/MW en el primer caso y 0,56 y 0,92 personas/MW en el segundo.

Existe una gran discrepancia entre las dos referencias bibliográficas encontradas, no obstante, ambas coinciden en que el número de puestos de trabajos generados por la hidroelectricidad es claramente superior a los generados por la geotermia. Para este estudio se va a considerar que en los sistemas hidroeléctricos convencionales se generan hasta 6 puestos de trabajo más que en la geotermia. Se considera a su vez que tanto los sistemas geotérmicos de circuito abierto como los sistemas geotérmicos de circuito cerrado generan el mismo número de puestos de trabajo. Al respecto de los sistemas energéticos que utilizan microturbinas se va a considerar que generan 5 veces menos puestos de trabajo que la geotermia por ser una tecnología aún por desarrollar y por la escasa potencia de estos sistemas energéticos.



En la tabla nº56 se muestran los valores considerados en la generación de puestos de trabajo:

|                                   | <b>Puestos de trabajo</b> | <b>Referencia</b>  |
|-----------------------------------|---------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 5                         | (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 5                         | (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 30                        | (Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül 2015; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1                         | -  |

Tabla nº56. Creación de puestos de trabajo de los sistemas analizados.

#### **5.6.1.10 Aceptación social**

La aceptación social es un parámetro subjetivo difícilmente medible. (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) consideran que la aceptación social de la geotermia es sensiblemente superior a la aceptación de proyectos hidroeléctricos. Esta afirmación se basa en que los proyectos hidroeléctricos suelen ir asociados a la construcción de presas, lo cual afecta gravemente tanto al medio ambiente del ecosistema afectado, llegando incluso a inundar pueblos enteros con el consiguiente desplazamiento de los habitantes de la zona. No obstante, la construcción de las presas tiene sus beneficios locales como pueden ser la regulación de avenidas y prevención de inundaciones naturales, así como el acceso a la capacidad de regadío para la agricultura local. Al respecto de la geotermia, (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) consideran que los circuitos abiertos pueden provocar malestar en los vecinos debido a la aparición de aguas subterráneas en los cauces naturales. Estas aguas pueden contener sustancias contaminantes si no son correctamente tratadas y pueden generar malos olores (Younger 2016).

(Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) proponen una valoración de aceptación social para la hidroelectricidad de 7 y para la geotermia de 6, aunque esgrimen los mismos argumentos que (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009). Según parece, la interpretación de la aceptación social depende mucho del juicio del autor del estudio. En este caso se va a considerar que la aceptación social de la geotermia es 3 veces mayor que la de la hidroelectricidad debido a que en el sistema geotérmico planteado no se generarán los efectos adversos que señalan



(Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009) y (Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) sino que esos efectos se están dando ya y la actuación los mitigará.

Por otro lado, se considera que la aceptación social de las microturbinas será alta debido a que supone una actuación menor sin afectar a mucho terreno ni al medioambiente. La aceptación social se considera similar a la de la geotermia.

En la tabla nº 57 se recogen los valores resumen antes señalados:

|                                   | <b>Aceptación social</b> | <b>Referencia</b>  |
|-----------------------------------|--------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 3                        | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 3                        | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 1                        | (Evans, A., Strezov, V. & Evans 2009; Chou, J.S. & Ongkowijoyo 2014) |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 3                        | -  |

Tabla nº57. Aceptación social de los sistemas analizados.

#### **5.6.1.11 Viabilidad de implantación**

La comparación de tecnologías disponibles llevada a cabo se ha realizado de manera general basándose en bibliografía relacionada. En algunas ocasiones existen condiciones particulares que no vienen reflejadas en los aspectos generales de las tecnologías evaluadas. Por lo tanto, se ha incorporado este subcriterio de carácter funcional para reflejar algunos aspectos de carácter local del estudio llevado a cabo y que pueden afectar a la valoración final de las alternativas.

#### **Aprovechamiento geotérmico (Circuito abierto)**

Se considera la alternativa de circuito abierto utilizando el agua que sale naturalmente de las minas y que actualmente acaba en los cauces naturales. Por esta razón, esta alternativa no supone ningún aspecto local perjudicial ya que va a mejorar la situación actual debido al tratamiento de las aguas que se vierten a los cauces naturales, acualmente sin ningún tratamiento.

No se considera la opción de la reinyección de las aguas en el terreno por falta de información sobre el estado estructural de las minas, actualmente inundadas. La reinyección de agua en



el terreno sin haber elaborado un estudio concienzudo de la estabilidad de las minas puede alterar la situación estructural y el régimen químico de las aguas del interior de la mina. Esto podría desembocar en afecciones a la superficie en forma de subsidencias o emanaciones de agua no controladas que pudieran generar inundaciones.

### **Aprovechamiento geotérmico (Circuito cerrado)**

Esta alternativa es muy similar a la de circuito abierto, sin embargo, no solucionaría el problema ambiental actual del valle Laciana al respecto de las descargas de agua de mina a cauces naturales y consiguiente contaminación de los mismos.

### **Aprovechamiento hidroeléctrico (Convencional)**

Para poder llevar a cabo esta alternativa se tendría que deprimir el nivel piezométrico en los pozos mineros de Calderón o María. Esto conllevaría, además de una inversión económica importante, asumir riesgos de subsidencias ya que no se conoce actualmente la competencia estructural de las galerías, por tanto, podrían derrumbarse y afectar a la superficie.

Otra opción sería generar una balsa de retención y canalizar el agua de mina hasta una zona donde se pudiera generar un salto hidráulico. Esta opción no parece muy razonable debido a la proximidad del embalse de las Rozas que en la actualidad dispone ya de aprovechamiento hidroeléctrico (Wikimapia 2020)(Embalses.net 2020). En caso de que el embalse de las Rozas tuviera problemas para llegar al nivel de agua necesario para generar el salto hidráulico, se podría utilizar el agua de las minas para aportar una mayor capacidad de regulación.

### **Aprovechamiento hidroeléctrico (Microturbinas)**

(Ye, G. & Soga 2012) hicieron un estudio detallado sobre distintas maneras de utilizar microturbinas para generar electricidad en conducciones existentes o de nueva construcción. Estos autores evaluaron tres métodos diferentes:

- Haciendo pasar el agua por una tubería de nueva construcción con una diferencia de potencial entre su inicio y su fin.
- Disponer una microturbina utilizando la caída de presión después de una válvula.
- Utilizando el tubo de Pitot.

Los tres sistemas fueron infructuosos debido a la poca energía que puede generar la microturbina. Esto hace pensar que la tecnología está aún poco desarrollada y puede ser difícil abordar una perspectiva comercial con la tecnología disponible hasta el momento.



### **Evaluación y asignación de valores**

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente señalados se le ha asignado una puntuación a cada una de las alternativas para favorecerlas o no en la evaluación final. La asignación de esta puntuación va de 1 a 10, siendo la alternativa con valor 10 la más favorable desde el punto de vista de viabilidad de implantación y 1 la alternativa menos favorable.

En la tabla nº58 se recoge la puntuación del criterio viabilidad de la implantación:

|                                   | <b>Viabilidad de implantación</b> | <b>Referencia</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 10                                | -                 |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 8                                 | -                 |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 4                                 | -                 |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1                                 | Ye 2012           |

Tabla nº58. Viabilidad de implantación de los sistemas analizados.

#### **5.6.2 Valoración de alternativas**

En este apartado se va a realizar la comparación por pares de las alternativas en función de los diversos subcriterios, al igual que se ha hecho anteriormente en la ponderación de criterios y subcriterios. Hay un total de cuatro (4) alternativas y de once subcriterios de evaluación, por lo tanto, se obtendrán un total de once matrices 4x4. Se va a obtener el vector de prioridad de cada una de estas once matrices y se sintetizarán todos los vectores de prioridad locales para obtener un vector de prioridad global que nos muestre la valoración final de cada alternativa.

##### **5.6.2.1 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de eficiencia**

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “eficiencia” para cada alternativa. Estos valores se muestran en la tabla nº59.



| Alternativa                       | Eficiencia (%) |
|-----------------------------------|----------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,15           |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,15           |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,90           |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,75           |

Tabla nº59. Valores del subcriterio “eficiencia” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “eficiencia”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij1}$  y mostrada en la tabla nº60:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,17                             | 0,20                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,17                             | 0,20                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 6,00                         | 6,00                         | 1,00                             | 1,20                              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 5,00                         | 5,00                         | 0,83                             | 1,00                              |

Tabla nº60. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “eficiencia”.

A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij1}$ , recogida en la tabla nº61 :

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 |

Tabla nº61. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “eficiencia”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de eficiencia quedaría como se muestra en la tabla nº62.





| Alternativa                       | Vector de prioridad |
|-----------------------------------|---------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,08                |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,08                |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,46                |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,38                |

Tabla n°62. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “eficiencia”.

### 5.6.2.2 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de potencia instalada

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “Potencia instalada” para cada alternativa, como se muestra en la tabla n°63:

| Alternativa                       | Energía generada (MWh) |
|-----------------------------------|------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 234,90                 |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 234,90                 |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 5.749,00               |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 50,00                  |

Tabla n°63. Valores del subcriterio “potencia instalada” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “potencia instalada”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij2}$ , reflejada en la tabla n°64:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,04                             | 4,70                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,04                             | 4,70                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 24,47                        | 24,47                        | 1,00                             | 114,98                            |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,21                         | 0,21                         | 0,01                             | 1,00                              |

Tabla n°64. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencia instalada”.



A continuación, se obtiene la matriz Bij2, recogida en la tabla nº65:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Tabla nº65. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencia instalada”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de potencia instalada quedaría como se refleja en la tabla nº66:

| Alternativa                       | Vector de prioridad |
|-----------------------------------|---------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,04                |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,04                |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,92                |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,01                |

Tabla nº66. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencia instalada”.

### 5.6.2.3 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de coste de inversión

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “coste de inversión” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº67:

| Alternativa                       | Inversión inicial (€) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1.540.000,00          |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1.540.000,00          |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 15.000.000,00         |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 100.000,00            |

Tabla nº67. Valores del subcriterio “coste de inversión” de las diversas alternativas.



Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “coste de inversión”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij3}$ , recogida en la tabla nº68:

|  | <b>Geotermia (Circuito abierto)</b> | <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b> | <b>Hidroelectricidad (convencional)</b> | <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| <b>Geotermia (Circuito abierto)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,10                                    | 15,40                                    |
| <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,10                                    | 15,40                                    |
| <b>Hidroelectricidad (convencional)</b>  | 9,74                                | 9,74                                | 1,00                                    | 150,00                                   |
| <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> | 0,06                                | 0,06                                | 0,01                                    | 1,00                                     |

Tabla nº68. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de inversión”.

A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij3}$ , mostrada en la tabla nº69:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 |
| 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Tabla nº69. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de inversión”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de coste de inversión quedaría como se refleja en la tabla nº70:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Vector de prioridad</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,04                       |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,04                       |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,92                       |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,01                       |

Tabla nº70. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de inversión”.



#### 5.6.2.4 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de coste de operación y mantenimiento

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “coste de operación y mantenimiento” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº71:

| Alternativa                       | Coste de operación (cent/kWh) |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 2,29                          |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 2,29                          |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 3,00                          |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,50                          |

Tabla nº71. Valores del subcriterio “coste de operación y mantenimiento” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “coste de operación y mantenimiento”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij4}$ , reflejada en la tabla nº72:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,76                             | 4,58                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,76                             | 4,58                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 1,31                         | 1,31                         | 1,00                             | 6,00                              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,22                         | 0,22                         | 0,17                             | 1,00                              |

Tabla nº72. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de operación y mantenimiento”.

A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij4}$ , reflejada en la tabla nº73:



|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |

Tabla nº73. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de operación y mantenimiento”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de coste de operación y mantenimiento quedaría como se muestra en la tabla nº74:

| Alternativa                       | Vector de prioridad |
|-----------------------------------|---------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,28                |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,28                |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,37                |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,06                |

Tabla nº74. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “coste de operación y mantenimiento”.

#### 5.6.2.5 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de ratio (€/kWh)

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “ratio (€/kWh)” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº75:

| Alternativa                       | Ratio €/kWh |
|-----------------------------------|-------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,09        |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,09        |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,11        |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,11        |

Tabla nº75. Valores del subcriterio “ratio (€/kWh)” de las diversas alternativas.



Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “ratio (€/kWh)”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar Aij5, como se refleja en la tabla nº76.

|  | <b>Geotermia (Circuito abierto)</b> | <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b> | <b>Hidroelectricidad (convencional)</b> | <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| <b>Geotermia (Circuito abierto)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,80                                    | 0,80                                     |
| <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,80                                    | 0,80                                     |
| <b>Hidroelectricidad (convencional)</b>  | 1,24                                | 1,24                                | 1,00                                    | 1,00                                     |
| <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> | 1,24                                | 1,24                                | 1,00                                    | 1,00                                     |

Tabla nº76. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “ratio (€/kWh)”.

A continuación, se obtiene la matriz Bij5, mostrada en la tabla nº77:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |

Tabla nº77. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “ratio (€/kWh)”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de ratio (€/kWh) quedaría como se recoge en la tabla nº78:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Vector de prioridad</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,22                       |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,22                       |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,28                       |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,28                       |

Tabla nº78. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “ratio (€/kWh)”.



### 5.6.2.6 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de retorno de la inversión

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “retorno de la inversión” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº79:

| Alternativa                       | Retorno de la inversión (años) |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 12,00                          |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 18,00                          |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 24,00                          |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 12,00                          |

Tabla nº79. Valores del subcriterio “retorno de la inversión” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “retorno de la inversión”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij6}$  y reflejada en la tabla nº80:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 0,67                         | 0,50                             | 1,00                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,50                         | 1,00                         | 0,75                             | 1,50                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 2,00                         | 1,33                         | 1,00                             | 2,00                              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1,00                         | 0,67                         | 0,50                             | 1,00                              |

Tabla nº80. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “retorno de la inversión”.

A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij6}$ , mostrada en la tabla nº81:



|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |

Tabla nº81. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “retorno de la inversión”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de retorno de la inversión quedaría como se ve en la tabla nº82:

| Alternativa                       | Vector de prioridad |
|-----------------------------------|---------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,18                |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,27                |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,36                |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,18                |

Tabla nº82. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “retorno de la inversión”.

#### 5.6.2.7 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de emisiones de CO<sub>2</sub>

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº83:

| Alternativa                       | Emisiones de CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /kWh) |
|-----------------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 160,00   |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 170,00   |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 41,00  |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 41,00  |

Tabla nº83. Valores del subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>” de las diversas alternativas.





Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar Aij7, reflejada en la tabla nº84:

|  | <b>Geotermia<br/>(Circuito<br/>abierto)</b> | <b>Geotermia<br/>(Circuito<br/>cerrado)</b> | <b>Hidroelectricidad<br/>(convencional)</b> | <b>Hidroelectricidad<br/>(microturbinas)</b> |
|--|---|---|---|--|
| <b>Geotermia<br/>(Circuito abierto)</b>      | 1,00  | 0,94  | 3,90  | 3,90   |
| <b>Geotermia<br/>(Circuito cerrado)</b>      | 1,06  | 1,00  | 4,15  | 4,15   |
| <b>Hidroelectricidad<br/>(convencional)</b>  | 0,26  | 0,24  | 1,00  | 1,00   |
| <b>Hidroelectricidad<br/>(microturbinas)</b> | 0,26  | 0,24  | 1,00  | 1,00   |

Tabla nº84. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>”.

A continuación, se obtiene la matriz Bij7, mostrada en la tabla nº85:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 |
| 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

Tabla nº85. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de emisiones de CO<sub>2</sub> quedaría como se observa en la tabla nº86:

| <b>Alternativa</b>                   | <b>Vector de<br/>prioridad</b> |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)         | 0,39                           |
| Geotermia (Circuito cerrado)         | 0,41                           |
| Hidroelectricidad<br>(convencional)  | 0,10                           |
| Hidroelectricidad<br>(microturbinas) | 0,10                           |

Tabla nº86. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “emisiones de CO<sub>2</sub>”.



### 5.6.2.8 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de uso del terreno

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “uso del terreno” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº87:

| Alternativa                       | Uso del terreno (km <sup>2</sup> /TWh) |
|-----------------------------------|--|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 46,00                                  |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 46,00                                  |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 411,50                                 |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 10,00                                  |

Tabla nº87. Valores del subcriterio “uso del terreno” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “uso del terreno”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar Aij8, reflejada en la tabla nº88:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,11                             | 4,60                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,00                         | 1,00                         | 0,11                             | 4,60                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 8,95                         | 8,95                         | 1,00                             | 41,15                             |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,22                         | 0,22                         | 0,02                             | 1,00                              |

Tabla nº88. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “uso del terreno”.

A continuación, se obtiene la matriz Bij8, mostrada en la tabla nº89:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

Tabla nº89. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “uso del terreno”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de uso del terreno quedaría como se puede ver en la tabla n°90:

| Alternativa                       | Vector de prioridad |
|-----------------------------------|---------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,09                |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,09                |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,80                |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,02                |

Tabla n°90. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “uso del terreno”.

#### 5.6.2.9 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de creación de puestos de trabajo

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “creación de puestos de trabajo” para cada alternativa, como se muestra en la tabla n°91:

| Alternativa                       | Puestos de trabajo (uds) |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 5,00                     |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 5,00                     |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 30,00                    |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1,00                     |

Tabla n°91. Valores del subcriterio “creación de puestos de trabajo” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “creación de puestos de trabajo”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij}$ , reflejada en la tabla n°92:



|  | <b>Geotermia (Circuito abierto)</b> | <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b> | <b>Hidroelectricidad (convencional)</b> | <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| <b>Geotermia (Circuito abierto)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,17                                    | 5,00                                     |
| <b>Geotermia (Circuito cerrado)</b>      | 1,00                                | 1,00                                | 0,17                                    | 5,00                                     |
| <b>Hidroelectricidad (convencional)</b>  | 6,00                                | 6,00                                | 1,00                                    | 30,00                                    |
| <b>Hidroelectricidad (microturbinas)</b> | 0,20                                | 0,20                                | 0,03                                    | 1,00                                     |

Tabla n°92. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “creación de puestos de trabajo”.

A continuación, se obtiene la matriz Bij9, reflejada en la tabla n°93:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

Tabla n°93. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “creación de puestos de trabajo”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de creación de puestos de trabajo quedaría como se ve en la tabla n°94:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Vector de prioridad</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,12                       |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,12                       |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,73                       |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,02                       |

Tabla n°94. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “creación de puestos de trabajo”.



### 5.6.2.10 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de aceptación social

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “aceptación social” para cada alternativa, como se muestra en la tabla nº95:

| Alternativa                       | Aceptación social |
|-----------------------------------|-------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 3,00              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 3,00              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 1,00              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 3,00              |

Tabla nº95. Valores del subcriterio “aceptación social” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “aceptación social”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar Aij10, reflejada en la tabla nº96:

|                                   | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 1,00                         | 1,00                         | 3,00                             | 1,00                              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 1,00                         | 1,00                         | 3,00                             | 1,00                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,33                         | 0,33                         | 1,00                             | 0,33                              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1,00                         | 1,00                         | 3,00                             | 1,00                              |

Tabla nº96. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “aceptación social”.

A continuación, se obtiene la matriz Bij10, mostrada en la tabla nº97:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |

Tabla nº97. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “aceptación social”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de aceptación social quedaría como se puede ver en la tabla n°98:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Vector de prioridad</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,30                       |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,30                       |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,10                       |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,30                       |

Tabla n°98. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “aceptación social”.

#### **5.6.2.11 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de viabilidad de implantación**

En primer lugar, se toman los valores reflejados en el apartado 5.6.1. para considerar un valor numérico del subcriterio “viabilidad de implantación” para cada alternativa, como se muestra en la tabla n°99:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Viabilidad de implantación</b> |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 10,00                             |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 8,00                              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 4,00                              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 1,00                              |

Tabla n°99. Valores del subcriterio “viabilidad de implantación” de las diversas alternativas.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “viabilidad de implantación”, obteniendo una matriz 4x4 que se va a denominar  $A_{ij11}$ , reflejada en la tabla n°100:



|  | <b>Geotermia<br/>(Circuito abierto)</b> | <b>Geotermia<br/>(Circuito cerrado)</b> | <b>Hidroelectricidad<br/>(convencional)</b> | <b>Hidroelectricidad<br/>(microturbinas)</b> |
|--|---|---|---|--|
| <b>Geotermia<br/>(Circuito abierto)</b>      | 1,00                                    | 1,25                                    | 2,50  | 10,00  |
| <b>Geotermia<br/>(Circuito cerrado)</b>      | 0,80                                    | 1,00                                    | 2,00  | 8,00   |
| <b>Hidroelectricidad<br/>(convencional)</b>  | 0,40                                    | 0,50                                    | 1,00  | 4,00   |
| <b>Hidroelectricidad<br/>(microturbinas)</b> | 0,10                                    | 0,13                                    | 0,25  | 1,00   |

Tabla nº100. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “viabilidad de implantación”.

A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij11}$ , mostrada en la tabla nº101:

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Tabla nº101. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “viabilidad de implantación”.

Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de viabilidad de implantación quedaría como se ve en la tabla nº102:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Vector de prioridad</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 0,43                       |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 0,35                       |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 0,17                       |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 0,04                       |

Tabla nº102. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “viabilidad de implantación”.



### 5.6.2.12 Evaluación de alternativa más ventajosa

Tras obtener los vectores de prioridad de cada una de las alternativas con respecto a cada uno de los subcriterios de evaluación establecidos, se procede a la evaluación de la alternativa más ventajosa.

En la tabla nº103 se puede ver un resumen de los vectores de prioridad obtenidos para cada uno de los subcriterios analizados.

| Subcriterio                          | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidroelectricidad (convencional) | Hidroelectricidad (microturbinas) |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Eficiencia                           | 0,08                         | 0,08                         | 0,46                             | 0,38                              |
| Potencia instalada (MW)              | 0,04                         | 0,04                         | 0,92                             | 0,01                              |
| Coste de inversión                   | 0,08                         | 0,08                         | 0,83                             | 0,01                              |
| Coste de operación y mantenimiento   | 0,28                         | 0,28                         | 0,37                             | 0,06                              |
| Ratio (€/kWh)                        | 0,22                         | 0,22                         | 0,28                             | 0,28                              |
| Retorno de la inversión (años)       | 0,18                         | 0,27                         | 0,36                             | 0,18                              |
| Emisiones de CO <sub>2</sub> (g/kWh) | 0,39                         | 0,41                         | 0,10                             | 0,10                              |
| Uso del terreno                      | 0,09                         | 0,09                         | 0,80                             | 0,02                              |
| Creación de puestos de trabajo       | 0,12                         | 0,12                         | 0,73                             | 0,02                              |
| Aceptación social                    | 0,30                         | 0,30                         | 0,10                             | 0,30                              |
| Viabilidad de implantación           | 0,43                         | 0,35                         | 0,17                             | 0,04                              |

Tabla nº103. Resumen de los vectores de prioridad de los subcriterios.

Se va a transformar cada uno de los valores de los vectores de prioridad (filas de la tabla nº103) para que sus valores se encuentren entre 0 y 10. Para ello se ha utilizado una formulación original del autor de la tesis que distingue si el valor superior del subcriterio es favorable o desfavorable.

Si el valor superior es favorable se utiliza la siguiente formulación:

$$P = 10 \cdot \frac{(Vx - Vi)}{(Vs - Vi)}$$

Donde Vx es el valor a transformar, Vs es el valor superior del vector de comparación y Vi es el valor inferior del vector de comparación. Al ser el valor superior favorable, se le asigna una valoración de 10 puntos mientras que al inferior se le asigna una valoración de 0 puntos.

Si el valor superior es desfavorable se utiliza la siguiente formulación:





$$P = 10 - 10 \cdot \frac{(Vx - Vi)}{(Vs - Vi)}$$

Donde  $Vx$  es el valor a transformar,  $Vs$  es el valor superior del vector de comparación y  $Vi$  es el valor inferior del vector de comparación. Al ser el valor superior desfavorable, se le asigna una valoración de 0 puntos mientras que al inferior se le asigna una valoración de 10 puntos.

Se muestra, a continuación, la consideración de valor superior favorable o desfavorable según subcriterios:

- Eficiencia: Valor superior favorable.
- Potencia instalada (MW): Valor superior favorable.
- Coste de inversión (€): Valor superior desfavorable.
- Coste de operación y mantenimiento: Valor superior desfavorable.
- Ratio (€/kWh): Valor superior desfavorable.
- Retorno de la inversión (años): Valor superior desfavorable.
- Emisión de CO<sub>2</sub> (gr/kWh): Valor superior desfavorable.
- Uso del terreno: Valor superior desfavorable.
- Creación de puestos de trabajo: Valor superior favorable.
- Aceptación social: Valor superior favorable.
- Viabilidad de implantación: Valor superior favorable.

También se tiene en cuenta la ponderación de los criterios y subcriterios multiplicando los valores de los vectores de prioridad por el correspondiente coeficiente de ponderación absoluto normalizado (CPa norm).

Una vez multiplicados los valores de los vectores de prioridad de las alternativas por los correspondientes CPa norm se procede a la suma de los resultados de cada alternativa.

El valor de esta suma refleja la valoración final de cada alternativa siendo la alternativa más ventajosa la que tenga un valor mayor.

A continuación, se presenta la tabla nº104, donde se resume lo explicado en este apartado. Se resalta en color naranja la valoración final de cada alternativa:



| Subcriterio                            | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidro-electricidad (convencional) | Hidro-electricidad (microturbinas) | CPa norm    | Geotermia (Circuito abierto) | Geotermia (Circuito cerrado) | Hidro-electricidad (convencional) | Hidro-electricidad (microturbinas) |
|--|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Eficiencia                             | 0,00                         | 0,00                         | 10,00                             | 8,00                               | <b>0,08</b> | 0,00                         | 0,00                         | 0,82                              | 0,66                               |
| Potencia instalada (MW)                | 0,32                         | 0,32                         | 10,00                             | 0,00                               | <b>0,04</b> | 0,01                         | 0,01                         | 0,41                              | 0,00                               |
| Coste de inversión                     | 9,03                         | 9,03                         | 0,00                              | 10,00                              | <b>0,12</b> | 1,12                         | 1,12                         | 0,00                              | 1,24                               |
| Coste de operación y mantenimiento     | 2,84                         | 2,84                         | 0,00                              | 10,00                              | <b>0,06</b> | 0,18                         | 0,18                         | 0,00                              | 0,62                               |
| Ratio (€/kWh)                          | 10,00                        | 10,00                        | 0,00                              | 0,00                               | <b>0,12</b> | 1,24                         | 1,24                         | 0,00                              | 0,00                               |
| Retorno de la inversión (años)         | 10,00                        | 5,00                         | 0,00                              | 10,00                              | <b>0,19</b> | 1,86                         | 0,93                         | 0,00                              | 1,86                               |
| Emissiones de CO <sub>2</sub> (gr/kWh) | 0,78                         | 0,00                         | 10,00                             | 10,00                              | <b>0,08</b> | 0,06                         | 0,00                         | 0,82                              | 0,82                               |
| Uso del terreno                        | 9,10                         | 9,10                         | 0,00                              | 10,00                              | <b>0,04</b> | 0,38                         | 0,38                         | 0,00                              | 0,41                               |
| Creación de puestos de trabajo         | 1,38                         | 1,38                         | 10,00                             | 0,00                               | <b>0,04</b> | 0,06                         | 0,06                         | 0,41                              | 0,00                               |
| Aceptación social                      | 10,00                        | 10,00                        | 0,00                              | 10,00                              | <b>0,04</b> | 0,41                         | 0,41                         | 0,00                              | 0,41                               |
| Viabilidad de implantación             | 10,00                        | 7,78                         | 3,33                              | 0,00                               | <b>0,19</b> | 1,86                         | 1,44                         | 0,62                              | 0,00                               |
| <b>SUMA</b>                            |                              |                              |                                   |                                    |             | <b>7,16</b>                  | <b>5,76</b>                  | <b>3,09</b>                       | <b>6,02</b>                        |

Tabla nº104. Evaluación de tecnologías existentes para el aprovechamiento energético del agua de las minas abandonadas del Valle Lacia



## 5.7 PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS

Tras realizar el estudio comparativo de las distintas tecnologías existentes para el aprovechamiento energético del agua de las minas abandonadas del Valle Laciana se concluye que la alternativa más ventajosa es ejecutar un aprovechamiento geotérmico con circuito abierto, seguida del aprovechamiento hidroeléctrico con microturbinas. Con una valoración ligeramente inferior se halla el aprovechamiento geotérmico con circuito cerrado y como opción menos ventajosa se encuentra la ejecución de un aprovechamiento hidroeléctrico convencional.

El resumen de las valoraciones se muestra en la tabla nº105:

| <b>Alternativa</b>                | <b>Valoración</b> |
|-----------------------------------|-------------------|
| Geotermia (Circuito abierto)      | 7,16              |
| Geotermia (Circuito cerrado)      | 5,76              |
| Hidroelectricidad (convencional)  | 3,09              |
| Hidroelectricidad (microturbinas) | 6,02              |

Tabla nº105. Valoración final de tecnologías existentes para el aprovechamiento energético del agua de las minas abandonadas del Valle Laciana



# CAPÍTULO VI. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO



## 6. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO

Como conclusión preliminar del capítulo V (Estudio comparativo entre tecnologías existentes), se ha obtenido que la alternativa más ventajosa para el aprovechamiento energético de las aguas de mina del valle Laciana es la implantación de un circuito abierto de geotermia.

En este capítulo se van a estudiar diversas alternativas de implantación de este tipo de instalación en la comarca de Laciana. Los lugares seleccionados para este estudio son los presentados en el capítulo IV (Caracterización de las aguas de mina).

### 6.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS UTILIZADA

En el capítulo anterior se realizó un extenso análisis sobre las diversas metodologías de análisis multicriterio existentes. Entre las estudiadas se destacaron:

- WSM
- WPM
- AHP
- PROMETHEE
- ELECTRE
- TOPSIS
- MADM difusos

Para la implementación, se va a utilizar la misma alternativa que en el estudio de alternativas del capítulo V, es decir, el procedimiento jerárquico analítico (AHP).

Las características generales de este procedimiento y su desarrollo se expusieron en el capítulo anterior, por ello, en este capítulo no se van a volver a detallar las mismas.

### 6.2 DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS

Para presentar las distintas alternativas se han elaborado una serie de tablas resumen que recogen los atributos más importantes de las mismas y que se pueden ver en el Anexo 2. Estas alternativas coinciden con los puntos de muestreo mostrados en el capítulo IV (Caracterización de las aguas de mina).

1. Mina de montaña del Grupo Calderón
2. Mina de montaña de Lumajo
3. Mina de montaña de Carrasconte



4. Transformadores de Calderón (recoge agua de la mina de montaña de Calderón)
5. Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de abajo)
6. Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de arriba)
7. Mina de montaña de Paulina
8. Pozo María
9. Transversal de Villablino (recoge aguas del Grupo Calderón y del Feixolín).

### 6.3 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS

Al igual que se hizo en el capítulo V. Estudio comparativo entre tecnologías existentes, se van a utilizar dos niveles de comparación (criterios y subcriterios) cada uno con una ponderación relativa.

#### 6.3.1 Definición de criterios

En esta ocasión no se van a utilizar los mismos criterios mostrados en el capítulo V. La principal diferencia entre los criterios propuestos por (Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada 2015; Strantzali, E. & Aravossis 2016; Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao 2009) y utilizados en el capítulo anterior es que no se va a tener en cuenta el criterio ambiental por considerar que no muestra una diferencia entre las diversas alternativas, es decir, el impacto ambiental de todas las alternativas es similar.

Por otro lado, se va a repetir la utilización del criterio funcional, al igual que se hizo en el capítulo V. En síntesis, los criterios utilizados en el análisis de alternativas de este capítulo son los siguientes:

- Técnico
- Económico
- Social
- Funcional

#### 6.3.2 Definición de subcriterios

##### 6.3.2.1 Establecimiento de subcriterios

La selección de subcriterios de este capítulo no será como la llevada a cabo en el capítulo V (Estudio comparativo entre tecnologías existentes). En este último se realizó una recopilación bibliográfica de los subcriterios más comunes en análisis de alternativas energéticas. Todas



las alternativas se basan en implantar el mismo tipo de tecnología, por lo tanto, no se pueden utilizar los subcriterios vistos en el capítulo anterior.

Los subcriterios tenidos en cuenta en este capítulo tienen un carácter mucho más particularizado y han sido estudiados localmente para cada una de las alternativas propuestas. Se han buscado subcriterios que fueran medibles en la campaña de campo y que muestren una diferencia clara entre alternativas para mejorar su comparación.

Los subcriterios tenidos en cuenta han sido los mostrados en la tabla nº106:

| Criterio  | Subcriterio                    | Abreviatura |
|-----------|--------------------------------|-------------|
| Técnico   | Temperatura                    | T (°C)      |
|           | Necesidad de tratamiento       | Trat        |
| Económico | Inversión estimada             | IE          |
| Social    | Potencial población abastecida | P           |
| Funcional | Posibles clientes              | C           |
|           | Capacidad de ampliación        | A           |

Tabla nº106. Subcriterios para el análisis de alternativas de aprovechamiento geotérmico de las aguas de mina del Valle Laciana.

### 6.3.2.2 Explicación de subcriterios

En este apartado se va a explicar la razón por la cual se ha elegido cada uno de los subcriterios reflejados en la tabla nº106.

#### Temperatura

Se ha medido la temperatura de las aguas de mina en todos los puntos de muestreo, los cuales coinciden con los lugares de implantación del circuito geotérmico de agua de mina de las alternativas de estudio. El valor final de la temperatura de las aguas se obtuvo tras hacer una media ponderada de los valores registrados en cuatro medidas a lo largo del año y una quinta de contraste (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a).

Cuanto mayor sea la temperatura del agua de entrada en el primario de un intercambiador, mayor será la temperatura en la salida del secundario, teniendo en cuenta un gradiente de temperatura invariable. Cuanto mayor sea el gradiente de temperatura, mayor será la entropía y menor será la efectividad del intercambiador (Andresen, B. & Gordon 1992). Por esta razón,



cuanto mayor sea la temperatura del agua de mina a utilizar, mejor rendimiento tendrá el sistema.

### Necesidad de tratamiento

En el capítulo IV de la presente tesis doctoral se han analizado las características de las aguas de mina del Valle Laciaana y se han obtenido los índices de Langelier y Ryznar para cada uno de los puntos de muestreo (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a).

El objetivo es utilizar el agua de estas minas como recurso energético en una red de calor que eleve la temperatura del agua a través de una bomba de calor. Las bombas de calor son máquinas eléctricas que utilizan un ciclo Carnot para extraer energía de una fuente de temperatura baja (Hepbasli, A. & Kalinci 2009). El agua que circule por una bomba de calor o por un intercambiador de calor debe estar correctamente tratada para evitar que se produzcan corrosiones o incrustaciones en los tubos del intercambiador que puedan disminuir la eficiencia térmica del equipo (Teng, K.H., Baharudin, R.H., Bakar, M.A. & Kazi 2016). El efecto de incrustaciones en intercambiadores de calor es la disminución de la transferencia de calor, aumento de la pérdida de carga y pueden desencadenar fallos en algunos intercambiadores de calor debido a la colmatación (Vasauskas, V. & Baskutis 2006). Las aguas con una gran concentración de sales son más tendientes a desarrollar este tipo de problemas (Teng, K.H., Baharudin, R.H., Bakar, M.A. & Kazi 2016).

Existen diversos sistemas de tratamiento de aguas para evitar los problemas derivados del uso de aguas de mina en intercambiadores de calor. (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018b) dividieron los distintos tratamientos existentes en dos categorías, los tratamientos destinados a evitar las incrustaciones y los tratamientos destinados a neutralizar drenajes ácidos de mina que puedan dañar el medio ambiente cuando se vierten en cauces naturales. El objetivo de estos últimos es aumentar el pH del agua y reducir el contenido de metales pesados disueltos (Cravotta 2010).

### Tratamientos de agua de mina destinados a mejorar la eficiencia de los intercambiadores

Uno de los factores determinantes a la hora de evitar incrustaciones es el control de la concentración de sales minerales en el agua (Wu, X. & Cremaschi 2012), por lo tanto, es crucial mantener la dureza del agua en niveles bajos (Teng, K.H., Baharudin, R.H., Bakar, M.A. & Kazi 2016). Los tratamientos reductores de la incrustación pueden dividirse en tratamientos físicos o químicos (Kim, W.T. & Cho 2001). La principal diferencia entre ambos





es que los físicos no utilizan agentes químicos mientras que los tratamientos químicos sí que los utilizan (Mclachlan 2011).

Entre los tratamientos físicos destacan los siguientes:

- Tratamientos con campos magnéticos: consisten en hacer pasar el agua por campos magnéticos que carguen las partículas del agua y aumenten las probabilidades de colisionar de las mismas, al colisionar y crear partículas más grandes, las partículas en suspensión se van depositando (Cho, Y.I., Lee, S.H. & Kim 2003; Cho, Y.I. & Mclachlan 2008; Parsons 1999).
- Dispositivo de inducción de bobina en solenoide: se instala un cable enrollado en una tubería por el que se hace pasar corriente eléctrica. De esta manera se forma un campo eléctrico que produce una agitación molecular que favorece la precipitación de calcio y de las partículas en suspensión (Cho, Y.I. & Mclachlan 2008; Cho, Y.I., Choi, B.G. & Bennat 1998).
- Dispositivos de campo eléctrico: el funcionamiento es el mismo que en el caso anterior, pero en este caso, en vez de utilizar un solenoide se utilizan dos electrodos que atraen las partículas. El electrodo positivo atrae las partículas negativas y el electrodo negativo atrae las partículas positivas favoreciendo la colisión entre las mismas (Cho, Y.I. & Mclachlan 2008; Cho 2002; Mclachlan 2011).

Entre los tratamientos químicos destacan:

- Inhibidores de procesos de incrustación: los métodos tradicionales para conseguir esto son la adición de cal o ceniza de sosa, añadir reactivos inhibidores o reemplazar las partículas incrustantes por iones solubles mediante el método del intercambio de iones (MacAdam, J. & Parsons 2004).
- Inhibidores de la corrosión: los más utilizados son los cromatos, fosfatos y el tolitriazol (TTA) (Choudhury, M.R., Hsieh, M.K., Vidic, R.D. & Dzombak 2012; Choi, D.J., You, S.J. & Kim 2002). Sin embargo, cada vez son menos utilizados debido a su toxicidad (Lake 1988).

### **Tratamientos de agua de mina destinados a remediar los drenajes ácidos**

Los problemas más importantes que generan los drenajes ácidos de mina son su acidez y el habitual gran contenido de metales pesados disueltos, lo cual puede producir efectos catastróficos en el medio ambiente en caso de ser vertidos sin control (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018b). Hay dos enfoques para remediar los drenajes ácidos de mina, la utilización de tratamientos activos y la utilización de tratamientos pasivos. Los tratamientos



activos están relacionados con la aplicación continua de materiales alcalinos para neutralizar el agua de mina ácida (Johnson, D.B. & Hallberg 2005), mientras que los pasivos consisten en sistemas que funcionan de forma natural, mediante procesos biológicos, sin la necesidad de adición de sustancias.

Entre los tratamientos activos se encuentran:

- Adición de cal: el método establecido para tratar los drenajes ácidos de mina es la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaO}$ , lo cual eleva el pH y hace precipitar los metales pesados en forma de hidróxidos (Elliot, P., Ragusa, S. & Catecheside 1998). Este proceso es costoso y produce un lodo contaminante como residuo que debe ser convenientemente tratado (Matlock, M.M., Howerton, B.S. & Atwood 2002; Wang, C.C., Fu, W.L. & Chang 1997).
- Biorreactores sulfidogénicos: utilizan la producción de  $\text{H}_2\text{S}$  para aumentar la alcalinidad y producir la precipitación de metales pesados (Jiménez-Rodríguez, A.M., Durán-Barrantes, M.M., Borja, R., Sánchez, E., Colmenarejo, M.F. & Raposo 2009; Johnson, D.B. & Hallberg 2005; Elliot, P., Ragusa, S. & Catecheside 1998; Neculita, C.M. & Zagury 2008).

Los tratamientos pasivos más destacados son:

- Canales abiertos con grava caliza: se trata de la construcción de canales por los que se hace pasar el agua de mina y en los que se introducen fragmentos de roca calcárea que está en contacto permanente con el agua (Skouson, J., Rose, A., Geidel, G., Evans, R. & Hallier 1998). En la figura nº 57 se puede ver un esquema de canal abierto:

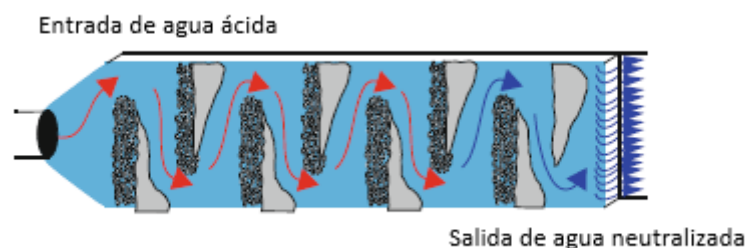


Figura nº57. Esquema de un canal abierto con grava caliza. Adaptado de (Cravotta 2010).

- Drenajes anóxicos de caliza (ALDs): se tratan de celdas enterradas rellenas de piedra calcárea por las que se hace pasar el agua de mina que se quiere neutralizar. La caliza se disuelve en el agua y aumenta la alcalinidad del agua (Watzlaf, G. R. & Hedin 1993). En la figura nº58 se puede ver el esquema de un ALD.

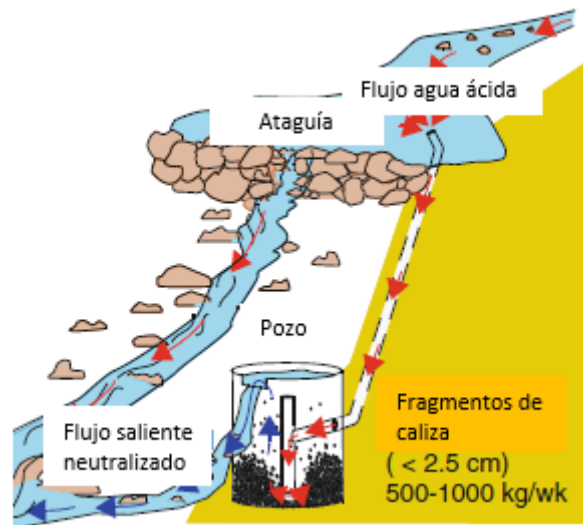


Figura nº58. Esquema de ALD. Adaptado de (Cravotta 2010).

- Humedales artificiales: mejoran la precipitación de Fe y otros metales debido al largo tiempo de residencia que pasan las aguas en los mismos y también debido a la aireación (Cravotta 2010; Skouson, J., Rose, A., Geidel, G., Evans, R. & Hallier 1998). Pueden ser aerobios o anaerobios, aunque lo más habitual es que combinen ambas condiciones.
- Sistemas anóxicos productores de alcalinidad (SAPs): incorporan el uso de materia orgánica combinada con un lecho de grava caliza. El flujo fluye verticalmente a través de materia orgánica y posteriormente a través de grava caliza saliendo finalmente por unas tuberías de drenaje (Kepler, D.A. & McCleary 1994).

### Inversión estimada

En cualquier análisis de alternativas se debe tener en cuenta la componente económica. En este caso se van a utilizar valores de inversión de proyectos similares a los que se quieren acometer en el Valle Laciana para tener una idea del coste inicial de la inversión.

### Potencial población abastecida

Se trata del número de personas que podría beneficiarse de la instalación geotérmica considerando que se hace de tal tamaño que pudiera abastecer a toda la población cercana.

### Posibles clientes

Para este estudio se han buscado los posibles clientes públicos que se encuentren en poblaciones cercanas a los puntos de muestreo. Por clientes públicos se entienden aquellos



edificios de titularidad pública como pueden ser edificios municipales, polideportivos y colegios o dependientes de la autoridad autonómica como centros de salud o institutos.

### **Capacidad de ampliación**

La existencia de pozos mineros en las inmediaciones de los puntos de muestreo se considera muy importante debido a que, a pesar de que en esta tesis no se tiene en cuenta, el aprovechamiento de la temperatura del agua en las profundidades de un pozo minero es muy interesante para la industria como demuestran los diversos ejemplos presentados en el estado actual de la técnica del capítulo II. Para el desarrollo de esta tesis no se disponen de los recursos necesarios para estudiar las características y la temperatura del agua de mina de los pozos mineros del Valle Laciana, por ello, el estudio se ha circunscrito al agua que drena de las minas de montaña. No obstante, pensando en el posible desarrollo industrial de la iniciativa propuesta en esta tesis, se ha decidido valorar positivamente la cercanía del punto de muestreo a un pozo minero.

### **6.3.3 Ponderación de criterios y subcriterios**

Se va a utilizar la metodología aplicada en el capítulo V (Bose, D. & Bose 1995; Kablan 2004). Siguiendo esta metodología se han obtenido los coeficientes de ponderación de los criterios (CPc) y los coeficientes de ponderación de los subcriterios (CPs). El producto de estos dos coeficientes son los coeficientes de ponderación absolutos (CPa) que serán aplicados a cada subcriterio.

#### **6.3.3.1 Ponderación de criterios**

Se le asigna a cada uno de los criterios seleccionados una valoración en función de su importancia, categorizándolos en tres grupos distintos:

- Muy relevantes: se le asigna una valoración de 3.
- Relevantes: se le asigna una valoración de 2.
- Poco relevantes: se le asigna una valoración de 1.

En la tabla nº107 se puede ver la categorización de los criterios:



| <b>Criterio</b> | <b>Puntuación</b> |
|-----------------|-------------------|
| Técnico         | 2                 |
| Económico       | 3                 |
| Social          | 1                 |
| Funcional       | 3                 |

Tabla nº107. Categorización de criterios.

La asignación de esta puntuación es original del autor de la tesis y se justifica de la siguiente manera:

- Criterio técnico: se considera un criterio relevante pero no crítico, ya que no pone en riesgo la viabilidad de la actuación.
- Criterio económico: se considera un criterio muy relevante ya que puede desembocar en la desestimación de la ejecución de la actuación por no considerarse competitivo o atractivo para ningún promotor.
- Criterio social: se considera un criterio poco relevante por su dificultad a la hora de ser medido y por la poca afección que tiene en la ejecución de la actuación.
- Criterio funcional: se considera un criterio muy relevante ya que puede derivar en la desestimación de la ejecución de la actuación por haber algún problema grave en la implantación del aprovechamiento energético. Además, en este criterio se recoge el conocimiento específico del área de estudio que se reflejó en el capítulo III.

Posteriormente se obtiene la matriz  $A_{ij}$  siguiendo la metodología detallada en el capítulo V y mostrada en la tabla nº108.

|                  | <b>Técnico</b> | <b>Económico</b> | <b>Social</b> | <b>Funcional</b> |
|------------------|----------------|------------------|---------------|------------------|
| <b>Técnico</b>   | 1,00           | 0,67             | 2,00          | 0,67             |
| <b>Económico</b> | 1,50           | 1,00             | 3,00          | 1,00             |
| <b>Social</b>    | 0,50           | 0,33             | 1,00          | 0,33             |
| <b>Funcional</b> | 1,50           | 1,00             | 3,00          | 1,00             |

Tabla nº108. Matriz de comparación por pares de criterios ( $A_{ij}$ )

Para obtener los CPc se obtiene la matriz otra matriz 4x4 ( $B_{ij}$ ) cuyos valores son los valores de la matriz  $A_{ij}$  divididos entre la suma de sus columnas, como se puede ver en la tabla nº109.



|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |

Tabla n°109. Matriz Bij de criterios.

La media de las filas de la matriz Bij representa el vector de prioridad y son los CPc, mostrados en la tabla n°110:

| Criterio  | CPc  |
|-----------|------|
| Técnico   | 0,22 |
| Económico | 0,33 |
| Social    | 0,11 |
| Funcional | 0,33 |

Tabla n°110. Coeficientes de Ponderación de los criterios (CPc)

Tal y como se detalló en el capítulo V, al tener la matriz Bij todos los elementos de sus filas iguales, se puede decir que la matriz tomada para valorar los criterios es consistente y se da por válida la categorización de los criterios.

### 6.3.3.2 Ponderación de subcriterios

La metodología utilizada para obtener los Coeficientes de Ponderación relativos a los subcriterios (CPs) es la misma expuesta en el apartado anterior. Se le ha asignado a cada uno de los subcriterios una valoración en función de su importancia, categorizándolos en tres grupos distintos:

- Muy relevantes: se le asigna una valoración de 3.
- Relevantes: se le asigna una valoración de 2.
- Poco relevantes: se le asigna una valoración de 1.

En la tabla n°111 se puede ver la categorización de los subcriterios:



| Subcriterio                    | Puntuación |
|--------------------------------|------------|
| Temperatura                    | 3          |
| Necesidad de tratamiento       | 2          |
| Inversión estimada             | 2          |
| Diferencia de cota             | 1          |
| Potencial población abastecida | 2          |
| Posibles clientes              | 2          |

Tabla nº111. Categorización de subcriterios.

La asignación de esta puntuación es original del autor de la tesis y se justifica de la siguiente manera:

- Subcriterio Temperatura: se considera un criterio muy relevante para la viabilidad del aprovechamiento geotérmico, dado que es una variable crítica en los cálculos termodinámicos que permiten calcular el potencial aprovechamiento energético.
- Subcriterio necesidad de tratamiento: se considera un criterio relevante a la hora de la implantación del aprovechamiento ya que repercute en el dimensionamiento del sistema y en el coste final de la actuación. También es un dato extraído de la caracterización in-situ de las aguas de mina.
- Subcriterio Inversión estimada: se considera el criterio más relevante de entre los subcriterios económicos. No se le da la ponderación máxima ya que no ha sido fácil hacer una estimación económica de todas las alternativas y se han tomado valores tipo que pueden tener alguna inexactitud.
- Subcriterio Diferencia de cota: se considera el criterio menos relevante de entre los subcriterios económicos. Afecta fundamentalmente al dimensionamiento de las bombas de impulsión de distribución.
- Subcriterio Potencial población abastecida: se trata del único subcriterio social y se considera relevante debido a que cuanto más población se pueda abastecer mayor repercusión e interés tendrá la iniciativa.
- Subcriterio Posibles clientes: se trata del único subcriterio funcional y se considera relevante debido que la viabilidad económica de la iniciativa depende de cuantos clientes puedan adherirse a la red de calor propuesta.

Al haber establecido un total de seis (6) subcriterios, la matriz de ponderación de subcriterios será de 6x6. Se muestran en las tablas nº112 y 113 las matrices  $A_{ij}$  y  $B_{ij}$  correspondientes a la evaluación de subcriterios:



|                                       | T (°C) | Necesidad de tratamiento | Inversión estimada | Distancia a núcleo de población | Potencial población abastecida | Posibles clientes |
|---------------------------------------|--------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| <b>Temperatura</b>                    | 1,00   | 1,50                     | 1,50               | 3,00                            | 1,50                           | 1,50              |
| <b>Necesidad de tratamiento</b>       | 0,67   | 1,00                     | 1,00               | 2,00                            | 1,00                           | 1,00              |
| <b>Inversión estimada</b>             | 0,67   | 1,00                     | 1,00               | 2,00                            | 1,00                           | 1,00              |
| <b>Diferencia de cota</b>             | 0,33   | 0,50                     | 0,50               | 1,00                            | 0,50                           | 0,50              |
| <b>Potencial población abastecida</b> | 0,67   | 1,00                     | 1,00               | 2,00                            | 1,00                           | 1,00              |
| <b>Posibles clientes</b>              | 0,67   | 1,00                     | 1,00               | 2,00                            | 1,00                           | 1,00              |

Tabla nº112. Categorización de subcriterios.

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |

Tabla nº113. Matriz Bij de criterios.

El vector de prioridad, el cual representa los coeficientes de ponderación de los subcriterios (CPs), es la media de las filas de la matriz Bij, mostrados en la tabla nº114.

| Subcriterio                    | CPs  |
|--------------------------------|------|
| Temperatura                    | 0,25 |
| Necesidad de tratamiento       | 0,17 |
| Inversión estimada             | 0,17 |
| Diferencia de cota             | 0,08 |
| Potencial población abastecida | 0,17 |
| Posibles clientes              | 0,17 |

Tabla nº114. Coeficientes de Ponderación de los subcriterios (CPs)





### 6.3.3.3 Coeficientes de ponderación absolutos

Los Coeficientes de ponderación absolutos (CPa) son la multiplicación de los Coeficientes de ponderación relativos de los criterios (CPc) por los Coeficientes de ponderación relativos de los subcriterios (CPs). En la tabla nº115 se pueden observar los CPa:

| <b>Criterio</b> | <b>Subcriterio</b>             | <b>CPc</b> | <b>CPs</b> | <b>Cpa</b> | <b>Cpa norm</b> |
|-----------------|--------------------------------|------------|------------|------------|-----------------|
| Técnico         | Temperatura                    | 0,22       | 0,25       | 0,06       | <b>0,22</b>     |
|                 | Necesidad de tratamiento       | 0,22       | 0,17       | 0,04       | <b>0,15</b>     |
| Económico       | Inversión estimada             | 0,33       | 0,17       | 0,06       | <b>0,22</b>     |
|                 | Diferencia de cota             | 0,33       | 0,08       | 0,03       | <b>0,11</b>     |
| Social          | Potencial población abastecida | 0,11       | 0,17       | 0,02       | <b>0,07</b>     |
| Funcional       | Posibles clientes              | 0,33       | 0,17       | 0,06       | <b>0,22</b>     |

Tabla nº115. Coeficientes de ponderación absolutos.

En la columna “CPa norm” se encuentran los CPa normalizados, representando los mismos en tanto por uno.

## 6.4 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA MÁS VENTAJOSA

### 6.4.1 Discusión de valores de subcriterios

En el presente apartado se va a justificar la valoración de cada una de las alternativas con respecto a los subcriterios establecidos.

#### 6.4.1.1 Temperatura

Los valores de temperatura medidos en cada punto de muestreo son los mostrados en el capítulo IV y también se pueden encontrar en (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a).

Estos valores se recogen en la tabla nº116:



| Alternativas                     | Temperatura (°C) |
|----------------------------------|------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 14,4             |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 12,9             |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 12,5             |
| Calderón transformadores (IV)    | 14,7             |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 12,2             |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 10               |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 9,8              |
| Senda verde María (VIII)         | 13,9             |
| Transversal Villablino (IX)      | 14,6             |

Tabla nº116. Valores de temperatura de las alternativas

#### 6.4.1.2 Necesidad de tratamiento

En primer lugar, se ha estudiado la naturaleza del agua en función de su índice de Langelier (LSI) (Rafferty 2000). Las aguas cuyo LSI está entre 0,50 y -0,50 son consideradas aguas equilibradas mientras que si el LSI del agua estudiada es menor de -0,50 se trata de un agua corrosiva. Si, por el contrario, su LSI es mayor que 0,50 se trata de un agua incrustante.

Los valores del índice de Langelier de las aguas de las distintas alternativas de implantación se puede consultar en la tabla nº34 del capítulo IV.

Por otro lado, se ha consultado el RD140/2003 (Ministerio de la Presidencia 2003) que fija la cantidad admisible de sustancias tóxicas dentro del agua para poder ser considerada como potable. Se han comparado los límites reflejados en este Real Decreto con los valores de laboratorio obtenido para cada una de las muestras de agua recogidas en los puntos de muestreo.

En la tabla nº30, del capítulo IV, se recogen los valores de las sustancias disueltas en las aguas estudiadas.



En la tabla nº117 se hace una diagnosis del tipo de tratamiento necesario en el agua de los lugares elegidos como alternativas de implantación en función de su LSI y de si satisface los límites reflejados en el RD140/2003 para agua potable :

| <b>Alternativas</b>              | <b>LSI</b> | <b>Sustancias disueltas</b> | <b>Diagnosis</b>   |
|----------------------------------|------------|-----------------------------|--|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,43       | Satisface RD140/2003        | No es necesario tratamiento  |
| Mina montaña Lumajo (II)         | -0,26      | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados                                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,1        | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados                                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,5        | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados y tratamiento antiincrustante         |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | -0,14      | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados                                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | -0,84      | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados y tratamiento para prevenir corrosión |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | -0,98      | Fe excesivo                 | Tratamiento para remoción de metales pesados y tratamiento para prevenir corrosión |
| Senda verde María (VIII)         | -0,06      | Fe y Mn excesivo            | Tratamiento para remoción de metales pesados                                       |
| Transversal Villablino (IX)      | -0,08      | Satisface RD140/2003        | No es necesario tratamiento  |

Tabla nº117. Diagnosis de tratamiento para el agua de cada alternativa.

Teniendo en cuenta los tipos de tratamiento de agua que se han visto en apartados anteriores se le ha asignado un tipo de tratamiento para cada una de las aguas estudiadas. Esta asignación se recoge en la tabla nº118:



| Muestra                     | Tratamiento                                     |
|-----------------------------|---|
| Mina montaña Calderón       | No es necesario tratamiento                     |
| Mina montaña Lumajo         | Biorreactor sulfidogénico                       |
| Mina montaña Carrasconte    | Biorreactor sulfidogénico                       |
| Calderón transformadores    | Biorreactor sulfidogénico + tratamiento físico  |
| Bolsada Caboalles de abajo  | Biorreactor sulfidogénico                       |
| Bolsada Caboalles de arriba | Sistema anóxico productor de alcalinidad (SAPS) |
| Mina Montaña Paulina        | Sistema anóxico productor de alcalinidad (SAPS) |
| Senda verde María           | Biorreactor sulfidogénico                       |
| Transversal Villablino      | No es necesario tratamiento                     |

Tabla n°118. Tratamientos requeridos para las aguas de las distintas alternativas.

Se le ha asignado una valoración numérica a cada uno de los tratamientos reflejados en la tabla anterior. Si no es necesario ningún tratamiento, a la alternativa se le asigna una puntuación de 5, si es necesario un tratamiento, a la alternativa se le asigna una puntuación de 2 y si es necesario efectuar dos tipos de tratamiento, se le asigna a la alternativa una puntuación de 1. La puntuación de cada una de las alternativas con respecto al tratamiento de agua necesario se puede ver en la tabla n°119:

| Alternativas                     | Tratamiento |
|----------------------------------|-------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 5           |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 2           |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 2           |
| Calderón transformadores (IV)    | 1           |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 2           |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 2           |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 2           |
| Senda verde María (VIII)         | 2           |
| Transversal Villablino (IX)      | 5           |

Tabla n°119. Puntuación de cada una de las alternativas con respecto al tratamiento necesario de sus aguas.



### 6.4.1.3 *Inversión estimada*

Para hacer una aproximación a la inversión estimada que puede requerir cada una de las alternativas estudiadas se han utilizado dos proyectos promovidos por Hulleras del Norte, S.A. en Asturias (España). Estos proyectos utilizan el agua de mina de dos pozos mineros que es introducida en una red de calor a través de un intercambiador de agua de mina y un sistema de bombas de calor. Estos dos proyectos son:

- Proyecto de ejecución de district heating geotérmico con agua de mina a diferentes edificios del entorno del pozo Barredo en Mieres (Asturias) (Fernández 2018).
- Proyecto de construcción de una red de calor a diferentes edificios en el entorno del pozo Fondón en Langreo (García-Carro, F.M. & Solís 2019).

Se han dividido los proyectos en tres conceptos económicos:

- Sistema de generación (incluyendo el intercambiador de mina, las enfriadoras, las conducciones entre ellos y todos los elementos electromecánicos de la sala de generación).
- Conducciones (este concepto incluye la zanja, las conducciones hasta las salas de los clientes, así como cualquier estructura necesaria para el paso de las conducciones)
- Salas técnicas de los clientes (los dos proyectos cuentan con un total de cuatro clientes, por lo tanto, se valoran cuatro salas técnicas).

También se han sacado tres ratios a partir de los trabajos antes mencionados:

- Coste de la sala de generación por kW instalado (Gen/pot).
- Coste del metro de conducciones (Distr/km).
- Coste por sala técnica individual de cliente (Salas/nº).

En la tabla nº120 se pueden ver los conceptos y ratios detallados:



|                           | <b>Barredo</b> | <b>Fondón</b> |
|---------------------------|----------------|---------------|
| <b>Sala de generación</b> | 551.000,00 €   | 592.500,00 €  |
| <b>Distribución</b>       | 378.000,00 €   | 754.500,00 €  |
| <b>Salas técnicas</b>     | 113.600,00 €   | 172.868,00 €  |
| <b>km</b>                 | 1,130          | 1,295         |
| <b>nºsalas tec</b>        | 4              | 4             |
| <b>potencia (MW)</b>      | 2              | 1,47          |
| <b>Gen/pot</b>            | 275,50 €       | 403,06 €      |
| <b>Distr/km</b>           | 334,51 €       | 582,63 €      |
| <b>Salas/nº</b>           | 28.400,00 €    | 43.217,00 €   |

Tabla nº120. Costes y valoración de parámetros de proyectos existentes de aprovechamiento térmico de aguas de mina.

La inversión estimada de cada una de las alternativas es la suma particularizada de estos tres conceptos. Se va a considerar que todas las alternativas tienen la misma potencia instalada y que abastecen al mismo número de clientes, por lo tanto, la única variante entre alternativas es el número de kilómetros de sus conducciones que se refleja como la distancia a los núcleos de población. En todos los casos la valoración de los conceptos utilizada para las alternativas es la media de los costes de ambos proyectos.

En la tabla nº121 se muestra la inversión inicial de las alternativas y el valor de kilómetros de conducciones estimados:



| Alternativas                     | Inversión estimada (€) | Población                   | Distancia a núcleo (km) |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 2.232.848,64 €         | Villager + Villablino       | 3,310                   |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 944.268,69 €           | Villaseca                   | 0,500                   |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 1.242.338,79 €         | Villaseca                   | 1,150                   |
| Calderón transformadores (IV)    | 2.232.848,64 €         | Villager + Villablino       | 3,310                   |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 1.813.257,66 €         | Caboalles de abajo+Villager | 2,395                   |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 1.173.553,38 €         | Caboalles de arriba         | 1,000                   |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 1.389.080,99 €         | Caboalles de arriba         | 1,470                   |
| Senda verde María (VIII)         | 1.127.696,44 €         | Caboalles de abajo          | 0,900                   |
| Transversal Villablino (IX)      | 1.150.624,91 €         | Villablino                  | 0,950                   |

Tabla nº121. Inversión estimada para cada una de las alternativas.

#### 6.4.1.4 Potencial población abastecida

La población potencial abastecida para cada alternativa ha sido consultada en el padrón municipal, a través de su versión digital en la página web del Ayuntamiento de Villablino, y se recoge en la tabla nº122:

| Alternativas                     | Potencial población abastecida | Población                   |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 5.487                          | Villager + Villablino       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 1.028                          | Villaseca                   |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 1.028                          | Villaseca                   |
| Calderón transformadores (IV)    | 5.487                          | Villager + Villablino       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 1.491                          | Caboalles de abajo+Villager |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 365                            | Caboalles de arriba         |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 365                            | Caboalles de arriba         |
| Senda verde María (VIII)         | 1.006                          | Caboalles de abajo          |
| Transversal Villablino (IX)      | 5.002                          | Villablino                  |

Tabla nº122. Población potencial que abastecer de cada una de las alternativas



#### 6.4.1.5 Posibles clientes

Los posibles clientes para abastecer en los diversos núcleos de población tenidos en cuenta en este estudio se recogen en la tabla nº123:

| Poblaciones         | Posibles clientes                |
|---------------------|----------------------------------|
| Villablino          | Ayuntamiento                     |
|                     | Casa de la cultura               |
|                     | Polideportivo                    |
|                     | IES Obispo Argüelles             |
|                     | IES Valle de Laciana             |
|                     | Colegio Público San Miguel       |
|                     | Cuartel de la guardia civil      |
| Villager            | Centro de salud Valle de Laciana |
| Caboalles de abajo  | Centro Asprona                   |
|                     | Residencia geriátrica El roble   |
|                     | Colegio público La Devesa        |
|                     | Polideportivo de Corea           |
| Caboalles de Arriba | Centro del Urogallo              |
| Villaseca           | Colegio Público El Campo         |
|                     | Consultorio de Villaseca         |
|                     | Polideportivo Villaseca          |

Tabla nº123. Clientes para abastecer en los núcleos del Valle Laciana.

El recuento total de clientes potenciales a ser abastecidos en cada una de las alternativas es el que se muestra en la tabla nº124:

| Alternativas                     | Posibles clientes |
|----------------------------------|-------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 8                 |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 3                 |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 3                 |
| Calderón transformadores (IV)    | 8                 |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 5                 |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 1                 |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 1                 |
| Senda verde María (VIII)         | 5                 |
| Transversal Villablino (IX)      | 7                 |

Tabla nº124. Posibles clientes en cada una de las alternativas.





#### 6.4.1.6 Capacidad de ampliación

La puntuación asignada a las alternativas de implantación que cuentan con un pozo minero cerca se ha valorado con 2 puntos, mientras que las que no cuentan con esta instalación cerca se han valorado con 1 debido a la imposibilidad de ampliar la instalación con el agua de los niveles inferiores del pozo. Estas puntuaciones se recogen en la tabla nº125:

| Alternativas                     | Capacidad de ampliación | Instalación   | Puntuación |
|----------------------------------|-------------------------|---------------|------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | Sí                      | Pozo Calderón | 2          |
| Mina montaña Lumajo (II)         | No                      |               | 1          |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | No                      |               | 1          |
| Calderón transformadores (IV)    | Sí                      | Pozo Calderón | 2          |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | No                      |               | 1          |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | No                      |               | 1          |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | No                      |               | 1          |
| Senda verde María (VIII)         | Sí                      | Pozo María    | 2          |
| Transversal Villablino (IX)      | No                      |               | 1          |

Tabla nº125. Evaluación de la capacidad de ampliación de las alternativas.

#### 6.4.2 Valoración de alternativas

En este apartado se va a realizar la comparación por pares de las alternativas en función de los diversos subcriterios. Hay un total de nueve (9) alternativas y de seis (6) subcriterios de evaluación, por lo tanto, se obtendrán un total de seis matrices 9x9. Se va a obtener el vector de prioridad de cada una de estas seis matrices y se sintetizarán todos los vectores de prioridad locales para obtener un vector de prioridad global que nos muestre la valoración final de cada alternativa.

##### 6.4.2.1 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de temperatura

Se toman los valores reflejados en la tabla nº116 para considerar un valor numérico del subcriterio "Temperatura" para cada alternativa. Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio "temperatura", obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar  $A_{ij1}$ , y reflejada en la tabla nº126.



|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 1,12                            | 1,15                                  | 0,98                               | 1,18                                  | 1,44                                    | 1,47                              | 1,04                            | 0,99                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,90                             | 1,00                            | 1,03                                  | 0,88                               | 1,06                                  | 1,29                                    | 1,32                              | 0,93                            | 0,88                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,87                             | 0,97                            | 1,00                                  | 0,85                               | 1,02                                  | 1,25                                    | 1,28                              | 0,90                            | 0,86                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 1,02                             | 1,14                            | 1,18                                  | 1,00                               | 1,20                                  | 1,47                                    | 1,50                              | 1,06                            | 1,01                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,85                             | 0,95                            | 0,98                                  | 0,83                               | 1,00                                  | 1,22                                    | 1,24                              | 0,88                            | 0,84                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,69                             | 0,78                            | 0,80                                  | 0,68                               | 0,82                                  | 1,00                                    | 1,02                              | 0,72                            | 0,68                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,68                             | 0,76                            | 0,78                                  | 0,67                               | 0,80                                  | 0,98                                    | 1,00                              | 0,71                            | 0,67                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 0,97                             | 1,08                            | 1,11                                  | 0,95                               | 1,14                                  | 1,39                                    | 1,42                              | 1,00                            | 0,95                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 1,01                             | 1,13                            | 1,17                                  | 0,99                               | 1,20                                  | 1,46                                    | 1,49                              | 1,05                            | 1,00                               |

Tabla n°126. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “temperatura”.



A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij1}$ , mostrada en la tabla nº127:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |

Tabla nº127. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “temperatura”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de temperatura quedaría como se ve en la tabla nº127:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,13                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,11                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,11                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,13                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,11                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,09                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,09                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,12                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,13                       |

Tabla nº127. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “temperatura”.

#### **6.4.2.2 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de necesidad de tratamiento**

Se toman los valores reflejados en la tabla nº119 para considerar un valor numérico del subcriterio “Necesidad de tratamiento” para cada alternativa.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “Necesidad de tratamiento”, obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar  $A_{ij2}$  y se refleja en la tabla nº128.



|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 2,50                            | 2,50                                  | 5,00                               | 2,50                                  | 2,50                                    | 2,50                              | 2,50                            | 1,00                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 0,20                             | 0,50                            | 0,50                                  | 1,00                               | 0,50                                  | 0,50                                    | 0,50                              | 0,50                            | 0,20                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 0,40                             | 1,00                            | 1,00                                  | 2,00                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 1,00                            | 0,40                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 1,00                             | 2,50                            | 2,50                                  | 5,00                               | 2,50                                  | 2,50                                    | 2,50                              | 2,50                            | 1,00                               |

Tabla nº128. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “Necesidad de tratamiento”.



A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij2}$ , mostrada en la tabla n°129:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |

Tabla n°129. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “Necesidad de tratamiento”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de necesidad de tratamiento quedaría como se ve en la tabla nº130:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,22                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,09                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,09                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,04                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,09                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,09                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,09                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,09                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,22                       |

Tabla nº130. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “Necesidad de tratamiento”.

#### **6.4.2.3 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de Inversión estimada**

Se toman los valores reflejados en la tabla nº120 para considerar un valor numérico del subcriterio “inversión estimada” para cada alternativa.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “inversión estimada”, obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar  $A_{ij3}$ , reflejada en la tabla nº131:



|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 2,36                            | 1,80                                  | 1,00                               | 1,23                                  | 1,90                                    | 1,61                              | 1,98                            | 1,94                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,42                             | 1,00                            | 0,76                                  | 0,42                               | 0,52                                  | 0,80                                    | 0,68                              | 0,84                            | 0,82                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,56                             | 1,32                            | 1,00                                  | 0,56                               | 0,69                                  | 1,06                                    | 0,89                              | 1,10                            | 1,08                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 1,00                             | 2,36                            | 1,80                                  | 1,00                               | 1,23                                  | 1,90                                    | 1,61                              | 1,98                            | 1,94                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,81                             | 1,92                            | 1,46                                  | 0,81                               | 1,00                                  | 1,55                                    | 1,31                              | 1,61                            | 1,58                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,53                             | 1,24                            | 0,94                                  | 0,53                               | 0,65                                  | 1,00                                    | 0,84                              | 1,04                            | 1,02                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,62                             | 1,47                            | 1,12                                  | 0,62                               | 0,77                                  | 1,18                                    | 1,00                              | 1,23                            | 1,21                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 0,51                             | 1,19                            | 0,91                                  | 0,51                               | 0,62                                  | 0,96                                    | 0,81                              | 1,00                            | 0,98                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 0,52                             | 1,22                            | 0,93                                  | 0,52                               | 0,63                                  | 0,98                                    | 0,83                              | 1,02                            | 1,00                               |

Tabla nº131. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “inversión estimada”.





A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij3}$ , mostrada en la tabla nº132:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |

Tabla nº132. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “inversión estimada”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de inversión estimada quedaría como se puede ver en la tabla n°133:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,17                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,07                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,09                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,17                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,14                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,09                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,10                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,08                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,09                       |

Tabla n°133. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “inversión estimada”.

#### **6.4.2.4 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de Potencial población abastecida**

Se toman los valores reflejados en la tabla n°122 para considerar un valor numérico del subcriterio “potencial población abastecida” para cada alternativa.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “potencial población abastecida”, obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar  $A_{ij4}$ , y se refleja en la tabla n°134:



|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 5,34                            | 5,34                                  | 1,00                               | 1,00                                  | 3,68                                    | 15,03                             | 5,45                            | 1,10                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,19                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,19                               | 0,19                                  | 0,69                                    | 2,82                              | 1,02                            | 0,21                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,19                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,19                               | 0,19                                  | 0,69                                    | 2,82                              | 1,02                            | 0,21                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 1,00                             | 5,34                            | 5,34                                  | 1,00                               | 1,00                                  | 3,68                                    | 15,03                             | 5,45                            | 1,10                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,27                             | 1,45                            | 1,45                                  | 0,27                               | 0,27                                  | 1,00                                    | 4,08                              | 1,48                            | 0,30                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,07                             | 0,36                            | 0,36                                  | 0,07                               | 0,07                                  | 0,24                                    | 1,00                              | 0,36                            | 0,07                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,07                             | 0,36                            | 0,36                                  | 0,07                               | 0,07                                  | 0,24                                    | 1,00                              | 0,36                            | 0,07                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 0,18                             | 0,98                            | 0,98                                  | 0,18                               | 0,18                                  | 0,67                                    | 2,76                              | 1,00                            | 0,20                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 0,91                             | 4,87                            | 4,87                                  | 0,91                               | 0,91                                  | 3,35                                    | 13,70                             | 4,97                            | 1,00                               |

Tabla nº134. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencial población abastecida”.



A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij}$ , mostrada en la tabla n°135:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 |

Tabla n°135. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencial población abastecida”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de potencial población abastecida quedaría como se puede ver en la tabla nº136:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,26                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,05                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,05                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,26                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,07                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,02                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,02                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,05                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,24                       |

Tabla nº136. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “potencial población abastecida”.

#### **6.4.2.5 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de Posibles clientes**

Se toman los valores reflejados en la tabla nº124 para considerar un valor numérico del subcriterio “posibles clientes” para cada alternativa.

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “posibles clientes”, obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar Aij5, reflejada en la tabla nº137:



|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 2,67                            | 2,67                                  | 1,00                               | 1,60                                  | 8,00                                    | 8,00                              | 1,60                            | 1,14                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,38                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,38                               | 0,60                                  | 3,00                                    | 3,00                              | 0,60                            | 0,43                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,38                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,38                               | 0,60                                  | 3,00                                    | 3,00                              | 0,60                            | 0,43                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 1,00                             | 2,67                            | 2,67                                  | 1,00                               | 1,60                                  | 8,00                                    | 8,00                              | 1,60                            | 1,14                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,63                             | 1,67                            | 1,67                                  | 0,63                               | 1,00                                  | 5,00                                    | 5,00                              | 1,00                            | 0,71                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,13                             | 0,33                            | 0,33                                  | 0,13                               | 0,20                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,20                            | 0,14                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,13                             | 0,33                            | 0,33                                  | 0,13                               | 0,20                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,20                            | 0,14                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 0,63                             | 1,67                            | 1,67                                  | 0,63                               | 1,00                                  | 5,00                                    | 5,00                              | 1,00                            | 0,71                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 0,88                             | 2,33                            | 2,33                                  | 0,88                               | 1,40                                  | 7,00                                    | 7,00                              | 1,40                            | 1,00                               |

Tabla nº137. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “posibles clientes”.



A continuación, se obtiene la matriz Bij5, mostrada en la tabla nº138:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |

Tabla nº138. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “posibles clientes”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de posibles clientes quedaría como se muestra en la tabla n°139:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,20                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,07                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,07                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,20                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,12                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,02                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,02                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,12                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,17                       |

Tabla n°139. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “posibles clientes”.

#### **6.4.2.6 Valoración de alternativas con respecto al subcriterio de Capacidad de ampliación**

Se toman los valores reflejados en la tabla n°125 para considerar un valor numérico del subcriterio “capacidad de ampliación” para cada alternativa

Posteriormente, se elabora la matriz de comparación por pares de cada una de las alternativas respecto al subcriterio “capacidad de ampliación”, obteniendo una matriz 9x9 que se va a denominar  $A_{ij6}$ , y se refleja en la tabla n°140:





|   | <b>Mina montaña Calderón (I)</b> | <b>Mina montaña Lumajo (II)</b> | <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b> | <b>Calderón transformados (IV)</b> | <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b> | <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b> | <b>Senda verde María (VIII)</b> | <b>Transversal Villablino (IX)</b> |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| <b>Mina montaña Calderón (I)</b>        | 1,00                             | 2,00                            | 2,00                                  | 1,00                               | 2,00                                  | 2,00                                    | 2,00                              | 1,00                            | 2,00                               |
| <b>Mina montaña Lumajo (II)</b>         | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |
| <b>Mina montaña Carrasconte (III)</b>   | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |
| <b>Calderón transformados (IV)</b>      | 1,00                             | 2,00                            | 2,00                                  | 1,00                               | 2,00                                  | 2,00                                    | 2,00                              | 1,00                            | 2,00                               |
| <b>Bolsada Caboalles de abajo (V)</b>   | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |
| <b>Bolsada Caboalles de arriba (VI)</b> | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |
| <b>Mina Montaña Paulina (VII)</b>       | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |
| <b>Senda verde María (VIII)</b>         | 1,00                             | 2,00                            | 2,00                                  | 1,00                               | 2,00                                  | 2,00                                    | 2,00                              | 1,00                            | 2,00                               |
| <b>Transversal Villablino (IX)</b>      | 0,50                             | 1,00                            | 1,00                                  | 0,50                               | 1,00                                  | 1,00                                    | 1,00                              | 0,50                            | 1,00                               |

Tabla nº140. Comparación por pares de las distintas alternativas respecto al subcriterio “capacidad de ampliación”.



A continuación, se obtiene la matriz  $B_{ij6}$ , recogida en la tabla nº141:

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |

Tabla nº141. Matriz de las distintas alternativas respecto al subcriterio “capacidad de ampliación”.



Por lo tanto, el vector de prioridad para cada una de las alternativas en función del subcriterio de capacidad de ampliación quedaría como se puede ver en la tabla nº142:

| <b>Alternativa</b>               | <b>Vector de prioridad</b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,17                       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,08                       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,08                       |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,17                       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,08                       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,08                       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,08                       |
| Senda verde María (VIII)         | 0,17                       |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,08                       |

Tabla nº142. Vector de prioridad de las distintas alternativas respecto al subcriterio “capacidad de ampliación”.

#### **6.4.2.7 Evaluación de alternativa más ventajosa**

Tras obtener los vectores de prioridad de cada una de las alternativas con respecto a cada uno de los subcriterios de evaluación establecidos, se procede a la evaluación de la alternativa más ventajosa.

En la tabla nº143 se puede ver un resumen de los vectores de prioridad obtenidos para cada uno de los subcriterios analizados.



|                                  | Temperatura (°C) | Tratamiento | Inversión estimada (€) | Potencial población abastecida | Posibles clientes | Capacidad de ampliación |
|----------------------------------|------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 0,13             | 0,22        | 0,17                   | 0,26                           | 0,20              | 0,17                    |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 0,11             | 0,09        | 0,07                   | 0,05                           | 0,07              | 0,08                    |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 0,11             | 0,09        | 0,09                   | 0,05                           | 0,07              | 0,08                    |
| Calderón transformadores (IV)    | 0,13             | 0,04        | 0,17                   | 0,26                           | 0,20              | 0,17                    |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 0,11             | 0,09        | 0,14                   | 0,07                           | 0,12              | 0,08                    |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,09             | 0,09        | 0,09                   | 0,02                           | 0,02              | 0,08                    |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 0,09             | 0,09        | 0,10                   | 0,02                           | 0,02              | 0,08                    |
| Senda verde María (VIII)         | 0,12             | 0,09        | 0,08                   | 0,05                           | 0,12              | 0,17                    |
| Transversal Villablino (IX)      | 0,13             | 0,22        | 0,09                   | 0,24                           | 0,17              | 0,08                    |

Tabla nº143. Resumen de los vectores de prioridad de los subcriterios para cada alternativa.



Se va a transformar cada uno de los valores de los vectores de prioridad (filas de la tabla nº100) para que sus valores se encuentren entre 0 y 10. Para ello se ha utilizado una formulación original del autor de la tesis que distingue si el valor superior del subcriterio es favorable o desfavorable. Esta formulación se puede consultar en el capítulo V de esta memoria, donde se desarrolló la priorización de alternativas tecnológicas.

Se muestra, a continuación, la consideración de valor superior favorable o desfavorable según subcriterios:

- Temperatura (°C): Valor superior favorable.
- Necesidad de tratamiento: Valor superior favorable.
- Inversión estimada (€): Valor superior desfavorable.
- Potencial población abastecida: Valor superior favorable.
- Posibles clientes: Valor superior favorable.
- Capacidad de ampliación: Valor superior favorable.

También se tiene en cuenta la ponderación de los criterios y subcriterios multiplicando lo valores de los vectores de prioridad por el correspondiente coeficiente de ponderación absoluto normalizado (CPa norm).

Una vez multiplicados los valores de los vectores de prioridad de las alternativas por los correspondientes CPa norm se procede a la suma de los resultados de cada alternativa.

El valor de esta suma refleja la valoración final de cada alternativa siendo la alternativa más ventajosa la que tenga un valor mayor.

A continuación, se presenta la tabla nº144 donde se resume lo explicado en este apartado, resaltando en color naranja la valoración final de cada alternativa:



|                                  | Temperatura (°C) | Tratamiento | Inversión estimada (€) | Potencial población abastecida | Posibles clientes | Capacidad de ampliación | SUMA        |
|----------------------------------|------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 9,36             | 10,00       | 0,00                   | 10,00                          | 10,00             | 10,00                   |             |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 6,17             | 2,50        | 11,66                  | 1,29                           | 2,86              | 0,00                    |             |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 5,32             | 2,50        | 8,96                   | 1,29                           | 2,86              | 0,00                    |             |
| Calderón transformadores (IV)    | 10,00            | 0,00        | 0,00                   | 10,00                          | 10,00             | 10,00                   |             |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 4,68             | 2,50        | 3,80                   | 2,20                           | 5,71              | 0,00                    |             |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,00             | 2,50        | 9,59                   | 0,00                           | 0,00              | 0,00                    |             |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | -0,43            | 2,50        | 7,63                   | 0,00                           | 0,00              | 0,00                    |             |
| Senda verde María (VIII)         | 8,30             | 2,50        | 10,00                  | 1,25                           | 5,71              | 10,00                   |             |
| Transversal Villablino (IX)      | 9,79             | 10,00       | 9,79                   | 9,05                           | 8,57              | 0,00                    |             |
| <b>Cpa norm</b>                  | <b>0,22</b>      | <b>0,15</b> | <b>0,22</b>            | <b>0,11</b>                    | <b>0,07</b>       | <b>0,22</b>             |             |
| Mina montaña Calderón (I)        | 2,08             | 1,48        | 0,00                   | 1,11                           | 0,74              | 2,22                    | <b>7,64</b> |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 1,37             | 0,37        | 2,59                   | 0,14                           | 0,21              | 0,00                    | <b>4,69</b> |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 1,18             | 0,37        | 1,99                   | 0,14                           | 0,21              | 0,00                    | <b>3,90</b> |
| Calderón transformadores (IV)    | 2,22             | 0,00        | 0,00                   | 1,11                           | 0,74              | 2,22                    | <b>6,30</b> |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 1,04             | 0,37        | 0,84                   | 0,24                           | 0,42              | 0,00                    | <b>2,92</b> |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 0,00             | 0,37        | 2,13                   | 0,00                           | 0,00              | 0,00                    | <b>2,50</b> |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | -0,09            | 0,37        | 1,70                   | 0,00                           | 0,00              | 0,00                    | <b>1,97</b> |
| Senda verde María (VIII)         | 1,84             | 0,37        | 2,22                   | 0,14                           | 0,42              | 2,22                    | <b>7,22</b> |
| Transversal Villablino (IX)      | 2,17             | 1,48        | 2,18                   | 1,01                           | 0,63              | 0,00                    | <b>7,47</b> |

Tabla nº144. Evaluación de alternativas para el aprovechamiento geotérmico del agua de las minas abandonadas del Valle Laciaña



## 6.5 PRIORIZACIÓN DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Tras realizar el estudio comparativo de las distintas alternativas para el aprovechamiento geotérmico del agua de las minas abandonadas del Valle Lacia se concluye que la alternativa más ventajosa es aprovechar el agua que drena la mina de montaña de Calderón, seguida del aprovechamiento de las aguas de la boca de mina “Transversal de Villablino”. La alternativa peor valorada es la utilización del agua de la mina de montaña de Paulina.

El resumen de las valoraciones se muestra en la tabla nº145:

| Alternativa                      | Valoración |
|----------------------------------|------------|
| Mina montaña Calderón (I)        | 7,64       |
| Mina montaña Lumajo (II)         | 4,69       |
| Mina montaña Carrasconte (III)   | 3,90       |
| Calderón transformadores (IV)    | 6,30       |
| Bolsada Caboalles de abajo (V)   | 2,92       |
| Bolsada Caboalles de arriba (VI) | 2,50       |
| Mina Montaña Paulina (VII)       | 1,97       |
| Senda verde María (VIII)         | 7,22       |
| Transversal Villablino (IX)      | 7,47       |

Tabla nº145. Valoración de alternativas para el aprovechamiento geotérmico del agua de las minas abandonadas del Valle Lacia

# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado en ingeniería de producción, minero-ambiental y de proyectos



**Tesis Doctoral**

**APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL AGUA DE  
LAS MINAS ABANDONADAS DEL VALLE LACIANA**

**TOMO II DE II**

AUTOR

D. Alejandro Matas Escamilla

Oviedo 2021





# CAPÍTULO VII. IMPLANTACIÓN Y DISEÑO



## 7. IMPLANTACIÓN Y DISEÑO

### 7.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo recoge el estudio de diseño e implantación del aprovechamiento geotérmico del agua de la mina de montaña de Calderón en el Valle Laciana.

Se desea poner de relevancia la importancia de este capítulo en el conjunto de la tesis ya que supone la culminación de todos los trabajos previos. El proceso científico que se ha llevado a cabo a lo largo de la misma empieza por la consulta de bibliografía especializada, sigue por la ejecución de ensayos originales para la obtención de parámetros del agua de mina y se culmina con la utilización de esos parámetros para elaborar modelos y métodos de cálculo propios que permiten dimensionar el sistema energético. Este capítulo supone un aporte importante del doctorando a la posible implementación futura de un aprovechamiento geotérmico en el área de estudio. En este aspecto es uno de los puntos donde radica la originalidad y la aportación propia de la tesis.

El aprovechamiento energético se va a realizar a través de una red de calor que aporte calefacción o agua caliente sanitaria a diversos edificios en los núcleos de población de Villager y de Villablino.

Estos edificios se van a denominar potenciales clientes o clientes, de ahora en adelante, y son los siguientes:

- Ayuntamiento de Villablino.
- Casa de la cultura de Villablino.
- Polideportivo municipal de Villablino.
- Colegio Público San Miguel de Laciana.
- I.E.S. Obispo Argüelles de Villablino.
- Centro de Salud Valle de Laciana.

La metodología general que sigue este estudio de diseño e implantación será la siguiente:

1. Realización del estudio de la demanda de los distintos clientes para conocer sus necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria.
2. Estimación del recurso energético que puede proporcionar el agua de la mina de montaña de Calderón, sin llegar a agotarse. Se pretende diseñar un sistema de almacenamiento de agua de mina para evitar la falta de abastecimiento en épocas del año con escasez del recurso.



3. Conociendo las necesidades energéticas de los clientes y el potencial energético de la fuente se diseñará el sistema de generación de agua caliente. Dentro de este sistema se incluyen el intercambiador de agua de mina, las enfriadoras, las bombas hidráulicas, el desgasificador, el sistema de expansión y el depósito térmico.
4. Posteriormente se diseñará el circuito hidráulico necesario para transportar el agua desde las instalaciones del pozo Calderón hasta los distintos clientes.
5. Por último, se diseñará la remodelación de las salas técnicas de los clientes para que pueda adoptarse el nuevo sistema de abastecimiento energético para calefacción o agua caliente sanitaria. No se pretende sustituir los sistemas caloríficos que existen actualmente dentro de los edificios, sino que se pretenden complementar. En las épocas en las que la demanda del cliente se pueda abastecer con la geotermia se utilizará únicamente la geotermia, sin embargo, puede ser que, en algunas puntas de consumo, los clientes demanden mayor potencia que la que puede suministrar la geotermia, por lo tanto, se dejan los métodos actuales de calefacción para cubrir esas puntas.

Los diseños teóricos de los diversos elementos de la red de calor irán acompañados de un completo estudio económico que pretende dar una estimación del coste económico que requiere la actuación. También se han elaborado planos de diseño que muestran la implantación de los distintos equipos en las salas técnicas correspondientes y que explican gráficamente el alcance de la actuación.

## 7.2. ESTUDIO DE DEMANDA TÉRMICA

Para poder dimensionar correctamente todos los equipos de la instalación es necesario conocer qué demanda térmica va a tener el sistema (Chramcov 2010). Para ello se han visitado todas las salas técnicas de los potenciales clientes considerados en este trabajo y se ha realizado un estudio de previsión de la demanda térmica que pueda haber en los edificios anualmente.

Se ha considerado que todos los edificios se conectan a la red a la vez. Esta situación puede no ser real, ya que en caso de que se ejecutara un proyecto energético de esta envergadura, seguramente se ejecutaría por fases, conectando diversos clientes en fases diferentes para controlar la inversión inicial. No obstante, para dimensionar los equipos de generación de calor es necesario contar con la demanda máxima que puede haber en el sistema.



### 7.2.1. IES Obispo Argüelles

El primer edificio recogido en este estudio es el Instituto de Enseñanza Secundaria Obispo Argüelles de Villablino. La razón de exponer los datos de este edificio en primer lugar es porque se trata del potencial cliente del que más información se ha podido recopilar, obteniendo incluso el estudio de eficiencia energética de sus tres sistemas térmicos (Devesa 2015):

- Edificio principal (referencia catastral: 8874501QH1587S0001EP)
- Edificio entrada (referencia catastral: 8874601QH1587N0001JW)
- Gimnasio (referencia catastral: 8874602QH1587S0001EP)

Todos los edificios se encuentran en la dirección postal siguiente: Av. Bierzo S/N 24100 León.

Toda la información de este edificio le ha sido remitida al autor por Pablo A. Merino Antón, secretario del centro. Sin su inestimable ayuda y atención no habría sido posible incluir a este edificio en el presente estudio.

#### 7.2.1.1. Potencia instalada IES Obispo Argüelles

Como se ha comentado anteriormente, el IES Obispo Argüelles cuenta con tres sistemas térmicos independientes, los cuáles se describen a continuación.

#### Sistema térmico del edificio principal

El edificio principal cuenta con una superficie construida de 3.258 m<sup>2</sup>, siendo 2.972 m<sup>2</sup> útiles. Las características constructivas de este edificio se recogen en la tabla nº146:

| Tipo de superficie   | Medición (m <sup>2</sup> ) | Transmitancia media ponderada (W/m <sup>2</sup> K) |
|----------------------|----------------------------|--|
| Suelo                | 1.203,77                   | 0,91   |
| Muro fachada         | 2.025,77                   | 0,76   |
| Cubierta             | 1.120,92                   | 0,82   |
| Huecos y lucernarios | 469,82                     | 4,12   |

Tabla nº146. Características constructivas edificio principal IES Obispo Argüelles

En la figura nº59 se puede ver el edificio principal del IES Obispo Argüelles:



Figura nº59. Edificio principal IES Obispo Argüelles

El sistema cuenta con una caldera estándar de 393 kW de potencia, que utiliza gasóleo como combustible y que tiene un rendimiento estacional del 70,50%, la cual se puede observar en la figura nº60.



Figura nº60. Caldera del edificio principal IES Obispo Argüelles

También cuenta con un termo generador de agua caliente sanitaria por efecto Joule con una potencia nominal de 5 kW y un rendimiento estacional del 90%.



### Sistema térmico del edificio de la entrada

El edificio situado a la entrada del IES Obispo Argüelles cuenta con una superficie construida de 2.638,90 m<sup>2</sup>, siendo 1.864,10 m<sup>2</sup> útiles y contando con las características que se recogen en la tabla nº147:

| Tipo de superficie   | Medición (m <sup>2</sup> ) | Transmitancia media ponderada (W/m <sup>2</sup> K) |
|----------------------|----------------------------|--|
| Suelo                | 584,00                     | 0,84   |
| Muro fachada         | 1.110,58                   | 0,36   |
| Cubierta             | 645,90                     | 0,46   |
| Huecos y lucernarios | 235,54                     | 3,77   |

Tabla nº147. Características constructivas edificio entrada IES Obispo Argüelles (Devesa 2015)

En la figura nº61 se puede observar el edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles.



Figura nº61. Edificio entrada IES Obispo Argüelles

El sistema cuenta con una caldera estándar de 192 kW de potencia, que utiliza gasóleo como combustible y que tiene un rendimiento estacional del 60,20%. Esta caldera se muestra en la figura nº62.



Figura nº62. Caldera del edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles

No dispone de ningún equipo generador de agua caliente.

### **Sistema térmico del gimnasio**

El gimnasio del IES Obispo Argüelles cuenta con una superficie construida de 628,50 m<sup>2</sup>, siendo 577,12 m<sup>2</sup> útiles. Las características de este edificio se recogen en la tabla nº148:

| <b>Tipo de superficie</b> | <b>Medición (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Transmitancia media ponderada (W/m<sup>2</sup>K)</b> |
|---------------------------|---------------------------------|---|
| Suelo                     | 594,00                          | 1   |
| Muro fachada              | 470,63                          | 0,74  |
| Cubierta                  | 577,15                          | 0,67  |
| Huecos y lucernarios      | 65,84                           | 3,5   |

Tabla nº148. Características constructivas gimnasio IES Obispo Argüelles (Devesa 2015)

En la figura nº63 se muestra la entrada a la sala de calderas del gimnasio del IES Obispo Argüelles.



Figura nº63. Gimnasio IES Obispo Argüelles

El sistema cuenta con dos calderas de 63,8 kW de potencia nominal. En el informe sobre la eficiencia energética del edificio (Devesa 2015) viene recogido que el sistema cuenta con un sistema de calefacción estándar de 149,50 kW de potencia, que utiliza gasóleo como combustible y que tiene un rendimiento estacional del 78,43%. Aunque haya una discrepancia entre la documentación consultada y la ficha de los propios equipos comprobada en la visita de campo, se va a tomar como cierto el valor recogido en el informe de (Devesa 2015) debido a que está del lado de la seguridad a la hora de hacer los cálculos de dimensionamiento de la instalación, por contar con una mayor potencia instalada.

Las dos calderas instaladas en la sala térmica del gimnasio del IES Obispo Argüelles, así como su placa de características, se pueden ver en la figura nº64.





Figura nº64. Calderas del gimnasio del IES Obispo Argüelles

La instalación del gimnasio también cuenta con un termo generador de agua caliente sanitaria por efecto Joule.



### **7.2.1.2. Estimación de distribución de la demanda IES Obispo Argüelles**

Para estimar la demanda energética del IES Obispo Argüelles se ha estimado que sus tres sistemas de calefacción funcionan simultáneamente, de esta manera, se consigue que los máximos de demanda sean lo mayores posible debido a que los tres sistemas estarán funcionando a su potencia máxima. Lo mismo ocurre con los mínimos del sistema, pero en caso contrario.

#### **Demanda diaria del IES Obispo Argüelles**

Para simular la demanda de un edificio es necesario realizar particiones temporales razonables que permitan estudiar las variaciones de la misma (Chramcov 2010). En este estudio se ha decidido realizar particiones horarias para evaluar la variación de la demanda confeccionando diagramas donde se vea la distribución de la demanda diariamente y a lo largo del año (Chramcov 2010). Para definir esta variación nos hemos basado en el estudio de demanda que se realizó en el proyecto de ejecución de District Heating geotérmico con agua de mina a diferentes edificios del entorno del pozo Barredo en Mieres (Asturias) (Fernández 2018). En este proyecto se realizó un estudio de demanda de diversos edificios, entre ellos el IES Bernaldo de Quirós de Mieres, el cual se supone suficientemente similar funcionalmente al IES Obispo Argüelles de Villablino como para considerar su misma distribución horaria de demanda.

Aunque se haya tomado la distribución temporal del IES Bernaldo de Quirós, los valores no son iguales puesto que como valores máximos de potencia se ha tomado lo máximo que dan los tres sistemas de calefacción instalados en el IES Obispo Argüelles, es decir:

- Sistema de calefacción edificio principal: 393 kW.
- Sistema de calefacción edificio entrada: 192 kW.
- Sistema de calefacción gimnasio: 149,50 kW.
- Demanda máxima total: 734,5 kW.

Suponiendo que los sistemas de calefacción están bien dimensionados, las calderas instaladas serán capaces de satisfacer la demanda máxima con un margen de seguridad aceptable. En este estudio se va a despreciar ese margen de seguridad y se va a suponer que la demanda máxima del edificio es el total de la potencia instalada, por tanto, en la hora de mayor demanda de calefacción y ACS del año se demandará 734,5 kWh.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº149:



| Cliente              | Obispo Argüelles |               |
|----------------------|------------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria   |               |
| Demanda máxima (kWh) | 734,5            |               |
| Hora                 | Factor           | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 1:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 2:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 3:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 4:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 5:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 6:00                 | 0,00             | 0,00          |
| 7:00                 | 1,00             | 734,50        |
| 8:00                 | 0,90             | 661,05        |
| 9:00                 | 0,80             | 587,60        |
| 10:00                | 0,70             | 514,15        |
| 11:00                | 0,60             | 440,70        |
| 12:00                | 0,50             | 367,25        |
| 13:00                | 0,45             | 330,53        |
| 14:00                | 0,40             | 293,80        |
| 15:00                | 0,35             | 257,08        |
| 16:00                | 0,30             | 220,35        |
| 17:00                | 0,30             | 220,35        |
| 18:00                | 0,35             | 257,08        |
| 19:00                | 0,40             | 293,80        |
| 20:00                | 0,45             | 330,53        |
| 21:00                | 0,00             | 0,00          |
| 22:00                | 0,00             | 0,00          |
| 23:00                | 0,00             | 0,00          |

Tabla nº149. Demanda diaria del IES Obispo Argüelles.

### Demanda anual del IES Obispo Argüelles

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en el IES Obispo Argüelles con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Se ha considerado que todos los días de un mismo mes tienen la misma variación, sin embargo, habría que descontar los fines de semana en los que la demanda energética es nula.



Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1, mientras que en los meses de verano en los que el centro permanece cerrado la demanda es nula y por tanto tienen un coeficiente de cero (0). A los meses en los que no se estima consumo de calefacción pero que el centro no permanece cerrado se les ha aplicado un factor de 0,1 puesto que sigue habiendo demanda de ACS en los vestuarios.

En la tabla nº150 se muestran los factores utilizados para cada mes del año, así como la demanda máxima estimada para cada mes.

| <b>Ciente</b>               | <b>Obispo Argüelles</b> |                      |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------|
| <b>Tipo de curva</b>        | <b>Anual-mensual</b>    |                      |
| <b>Demanda máxima (kWh)</b> | <b>734,5</b>            |                      |
| <b>Hora</b>                 | <b>Factor</b>           | <b>Demanda (kWh)</b> |
| Enero                       | 1                       | 734,5                |
| Febrero                     | 1                       | 734,5                |
| Marzo                       | 1                       | 734,5                |
| Abril                       | 0,5                     | 367,25               |
| Mayo                        | 0,1                     | 73,45                |
| Junio                       | 0,1                     | 73,45                |
| Julio                       | 0                       | 0                    |
| Agosto                      | 0                       | 0                    |
| Septiembre                  | 0,1                     | 73,45                |
| Octubre                     | 0,5                     | 367,25               |
| Noviembre                   | 1                       | 734,5                |
| Diciembre                   | 1                       | 734,5                |

Tabla nº150. Factores de ponderación mensuales de la demanda del IES Obispo Argüelles.

### 7.2.2. Ayuntamiento de Villablino

El edificio del Ayuntamiento de Villablino se trata de un edificio de cinco pisos situado en la Avenida de la Constitución, nº23. La superficie construida del inmueble ronda los 405 m<sup>2</sup>. Esta medición se ha obtenido midiendo la superficie de la planta del edificio en visores cartográficos. En la figura nº65 se puede ver la entrada del Ayuntamiento de Villablino.



Figura nº65. Edificio del Ayuntamiento de Villablino.

#### **7.2.2.1. Potencia instalada Ayuntamiento de Villablino**

No se ha podido conseguir documentación del edificio del ayuntamiento de Villablino, sin embargo, sí que se ha podido realizar una visita a su sala técnica de la cual se han extraído los datos recogidos en este estudio.

El edificio del ayuntamiento se calienta mediante una caldera de gasoil de 127,2 kW de potencia instalada, la cual se muestra en la figura nº66.



Figura nº66. Caldera del Ayuntamiento de Villablino.

#### ***7.2.2.2. Estimación de distribución de la demanda Ayuntamiento de Villablino***

##### **Demanda diaria del Ayuntamiento de Villablino**

El edificio del Ayuntamiento de Villablino es un edificio público que tiene un horario de apertura de ocho de la mañana a tres de la tarde permaneciendo cerrado el resto de las horas del día. La calefacción se conecta de una manera intensa en las primeras horas de la mañana para caldear el edificio mientras que se va bajando paulatinamente a lo largo de la mañana como pasa en otros edificios públicos como es el caso de los institutos o universidades (Fernández 2018).

Suponiendo que el sistema de calefacción está bien dimensionado, la caldera instalada será capaz de satisfacer la demanda máxima del edificio con un margen de seguridad aceptable. En este estudio se desprecia ese margen de seguridad y se supone que la demanda máxima del edificio es el total de la potencia instalada, por tanto, en la hora de mayor demanda de calefacción del año se demandarán 127,2 kWh.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº151:



| Cliente              | Ayuntamiento   |               |
|----------------------|----------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria |               |
| Demanda máxima (kWh) | 127,2          |               |
| Hora                 | Factor         | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0              | 0             |
| 1:00                 | 0              | 0             |
| 2:00                 | 0              | 0             |
| 3:00                 | 0              | 0             |
| 4:00                 | 0              | 0             |
| 5:00                 | 0              | 0             |
| 6:00                 | 0              | 0             |
| 7:00                 | 1              | 127,2         |
| 8:00                 | 0,9            | 114,48        |
| 9:00                 | 0,8            | 101,76        |
| 10:00                | 0,7            | 89,04         |
| 11:00                | 0,6            | 76,32         |
| 12:00                | 0,5            | 63,6          |
| 13:00                | 0,45           | 57,24         |
| 14:00                | 0,4            | 50,88         |
| 15:00                | 0,35           | 44,52         |
| 16:00                | 0,3            | 38,16         |
| 17:00                | 0              | 0             |
| 18:00                | 0              | 0             |
| 19:00                | 0              | 0             |
| 20:00                | 0              | 0             |
| 21:00                | 0              | 0             |
| 22:00                | 0              | 0             |
| 23:00                | 0              | 0             |

Tabla nº151. Demanda diaria del Ayuntamiento de Villablino.

### Demanda anual del Ayuntamiento de Villablino

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en el Ayuntamiento de Villablino con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Se ha considerado que todos los días de un mismo mes tienen la misma variación, sin embargo, habría que descontar los fines de semana en los que la demanda energética es nula.

Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1, mientras que en los meses en los que no se necesita calefacción la demanda es nula,



ya que el edificio no tiene demanda de ACS, y por tanto se les aplica un factor de 0. Los meses de abril y octubre pueden tener demandas parciales de calefacción, por lo que se les ha asignado un valor intermedio (0,5).

En la tabla nº152 se muestran los factores utilizados para cada mes del año, así como la demanda máxima que se puede dar en una hora mensualmente.

| <b>Cliente</b>              | <b>Ayuntamiento</b>  |                      |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Tipo de curva</b>        | <b>Anual-mensual</b> |                      |
| <b>Demanda máxima (kWh)</b> | <b>127,2</b>         |                      |
| <b>Hora</b>                 | <b>Factor</b>        | <b>Demanda (kWh)</b> |
| Enero                       | 1                    | 127,2                |
| Febrero                     | 1                    | 127,2                |
| Marzo                       | 1                    | 127,2                |
| Abril                       | 0,5                  | 63,6                 |
| Mayo                        | 0                    | 0                    |
| Junio                       | 0                    | 0                    |
| Julio                       | 0                    | 0                    |
| Agosto                      | 0                    | 0                    |
| Septiembre                  | 0                    | 0                    |
| Octubre                     | 0,5                  | 63,6                 |
| Noviembre                   | 1                    | 127,2                |
| Diciembre                   | 1                    | 127,2                |

Tabla nº152. Factores de ponderación mensuales de la demanda del Ayuntamiento de Villablino.

### 7.2.3. Casa de la cultura de Villablino

La casa de la cultura de Villablino se trata de un edificio de forma irregular situado en la plaza Luis Mateo de Villablino. Este edificio se puede dividir en dos espacios principales, el primero de ellos es el edificio administrativo, el cual cuenta con una superficie que ronda los 585 m<sup>2</sup> y que consta de cuatro plantas, mientras que el segundo corresponde al salón de actos que tiene una única planta y una superficie de 330 m<sup>2</sup>. Estas mediciones se han obtenido midiendo la superficie de la planta del edificio en visores cartográficos.

En la figura nº67 se puede ver una imagen de la entrada de la casa de la cultura de Villablino.





Figura nº67. Alzado de la Casa de la Cultura de Villablino.

### **7.2.3.1. Potencia instalada Casa de la cultura de Villablino**

La casa de la cultura de Villablino cuenta con una caldera de carbón antigua de la que no se pudo determinar su potencia nominal ni aun yendo a hacer una visita a la sala técnica puesto que no disponía de placa de características. La figura nº68 muestra una imagen de esta caldera.



Figura nº68. Caldera de carbón de la Casa de la Cultura de Villablino



### 7.2.3.2. *Estimación de distribución de la demanda Casa de la cultura de Villablino*

#### Demanda diaria de la Casa de la cultura de Villablino

La casa de la Cultura de Villablino es un edificio público destinado a fomentar actividades, realizar exposiciones y albergar espectáculos. Al depender del servicio municipal se considera que la rutina de puesta en marcha de la calefacción empieza por la mañana a la misma hora que la del edificio del Ayuntamiento, ya que, tras encender la calefacción del edificio del Ayuntamiento, el personal de mantenimiento de calefacciones de las instalaciones municipales se trasladará a la Casa de Cultura para encender la calefacción de la misma.

Aunque tenga la misma rutina de calefacción en que el edificio del Ayuntamiento por las mañanas, por las tardes sigue habiendo actividades y clases, por lo tanto, hasta las 20:00 la calefacción de este edificio tiene que seguir estando activa.

Como se ha indicado anteriormente, tras la visita a la sala técnica no ha sido posible determinar la potencia nominal de la caldera, por lo tanto, se va a utilizar el método expuesto por (Trojanowska, M. & Szul 2008) para saber la demanda máxima del edificio.

Se trata de un edificio municipal, por lo tanto, su demanda de calefacción se puede estimar mediante la siguiente expresión (Trojanowska, M. & Szul 2008):

$$B_{OGU} = \frac{c_2 \cdot V}{\eta_K}$$

Siendo:

$B_{OGU}$  : Demanda de calefacción del edificio público [tpu]

$c_2$  : constante igual a 0,0083 (Trojanowska, M. & Szul 2008)

$V$  : cubicación del edificio [m<sup>3</sup>]

$\eta_K$ : eficiencia de la caldera (0,7 por tratarse de una caldera de carbón) (Trojanowska, M. & Szul 2008)

En la descripción del edificio se ha especificado que el mismo consta de dos espacios diferenciados:

- Edificio administrativo: Cuatro alturas y una planta de 585 m<sup>2</sup> lo que se traduce en un volumen de 5.850 m<sup>3</sup>, considerando que cada planta tiene un espacio libre de 2,50 metros.



- Salón de actos: Una única altura con una planta de 330 m<sup>2</sup> lo que implica un espacio de 825 m<sup>2</sup> para aclimatar.

La cubicación total del edificio es de 6.675 m<sup>3</sup>, por tanto, la expresión mostrada arroja un valor de:

$$B_{OGU} = 79,15 \text{ tpu}$$

La unidad [tpu] que se encuentra en el estudio de (Trojanowska, M. & Szul 2008) no se trata de una unidad de energía convencional, sino que se trata de las toneladas de combustible que consume el edificio en cuestión en un año (Trojanowska, M. & Tomasz 2006). Tanto en la constante  $c_2$ , antes reflejada, como en la eficacia de la caldera, se ha tenido en cuenta que el combustible utilizado es el carbón, por lo tanto, estas toneladas año se van a considerar como si fueran toneladas de lignito pardo.

Esta consideración se hace para poder utilizar los cambios de unidades que adopta el Instituto Energético de Galicia (INEGA 2020).

Siguiendo los cambios de unidades utilizados por (INEGA 2020):

- 1 tonelada de lignito pardo = 0,1939 tep
- 1 MWh = 0,086 tep

Se tiene que  $B_{OGU} = 178,45$  MWh/año.

Teniendo en cuenta que en (Trojanowska, M. & Tomasz 2006) se consideran 222 días de calefacción al año, y lo cual repercute en la constante  $c_2$ :

$$B_{OGU} = 803,82 \text{ kWh/día.}$$

Esto es la suma de la energía consumida en un día, sin embargo, ese consumo no se distribuye por igual en las 24 horas del día, sino que es más acusado por la mañana, como se ha explicado anteriormente en el caso de la distribución de demanda del Ayuntamiento de Villablino.

Sabiendo esta distribución y el total de consumo diario se puede conocer la demanda máxima, correspondiente a 107,17 kWh, la cuál es sensiblemente parecida a la del Ayuntamiento de Villablino, lo que valida la estimación de demanda llevada a cabo para la Casa de Cultura de Villablino.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº153:



| Cliente              | Casa de la cultura |               |
|----------------------|--------------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria     |               |
| Demanda máxima (kWh) | 107,18             |               |
| Hora                 | Factor             | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0                  | 0             |
| 1:00                 | 0                  | 0             |
| 2:00                 | 0                  | 0             |
| 3:00                 | 0                  | 0             |
| 4:00                 | 0                  | 0             |
| 5:00                 | 0                  | 0             |
| 6:00                 | 0                  | 0             |
| 7:00                 | 1                  | 107,18        |
| 8:00                 | 0,9                | 96,46         |
| 9:00                 | 0,8                | 85,74         |
| 10:00                | 0,7                | 75,02         |
| 11:00                | 0,6                | 64,31         |
| 12:00                | 0,5                | 53,59         |
| 13:00                | 0,45               | 48,23         |
| 14:00                | 0,4                | 42,87         |
| 15:00                | 0,35               | 37,51         |
| 16:00                | 0,3                | 32,15         |
| 17:00                | 0,3                | 32,15         |
| 18:00                | 0,35               | 37,51         |
| 19:00                | 0,4                | 42,87         |
| 20:00                | 0,45               | 48,23         |
| 21:00                | 0                  | 0             |
| 22:00                | 0                  | 0             |
| 23:00                | 0                  | 0             |

Tabla nº153. Demanda diaria de la Casa de la Cultura de Villablino.

### Demanda anual de la Casa de la Cultura de Villablino

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en la Casa de la Cultura de Villablino con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Se ha considerado que todos los días de un mismo mes tienen la misma variación, sin embargo, y como en casos anteriores, habría que descontar los fines de semana en los que la demanda energética es nula.

Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1, mientras que en los meses en los que no se necesita calefacción la demanda es nula,



ya que el edificio no tiene demanda de ACS, y por tanto se les aplica un factor de 0. Al igual que en el caso del Ayuntamiento, abril y octubre, en situación intermedia, se ponderan con un factor de 0,5.

En la tabla nº154 se muestran los factores utilizados para cada mes del año, así como la demanda máxima horaria por mes.

| Cliente              | Casa de la cultura |               |
|----------------------|--------------------|---------------|
| Tipo de curva        | Anual-mensual      |               |
| Demanda máxima (kWh) | 107,18             |               |
| Mes                  | Factor             | Demanda (kWh) |
| Enero                | 1                  | 107,18        |
| Febrero              | 1                  | 107,18        |
| Marzo                | 1                  | 107,18        |
| Abril                | 0,5                | 53,59         |
| Mayo                 | 0                  | 0             |
| Junio                | 0                  | 0             |
| Julio                | 0                  | 0             |
| Agosto               | 0                  | 0             |
| Septiembre           | 0                  | 0             |
| Octubre              | 0,5                | 53,59         |
| Noviembre            | 1                  | 107,18        |
| Diciembre            | 1                  | 107,18        |

Tabla nº154. Factores de ponderación mensuales de la demanda de la Casa de la Cultura de Villablino.

#### 7.2.4. Polideportivo de Villablino

El polideportivo de Villablino es un complejo que cuenta con un pabellón con una pista polideportiva que se puede utilizar como campo de balonmano, baloncesto y fútbol sala. Además, este edificio cuenta con baños y vestuarios que usan los usuarios del pabellón y de las pistas exteriores de tenis, pádel, frontón y fútbol once.

El complejo cuenta además con una piscina exterior y un edificio auxiliar que también cuenta con baños y vestuarios. En la figura nº69 se muestra la entrada del polideportivo de Villablino.



Figura nº69. Vista de la entrada al polideportivo de Villablino.

#### **7.2.4.1. Potencia instalada Polideportivo de Villablino**

Todas las instalaciones están climatizadas con un sistema mixto de biomasa (pellets) y gasoil. La caldera de pellets tiene una potencia nominal de 250 kW con un sistema de alimentación de tornillo sin fin y un sistema de captación de partículas consistente en un pequeño ciclón. Este sistema está apoyado por dos calderas de gasoil de las cuáles se desconoce su potencia debido a que en las placas de características de las mismas no venía reflejado. En las figuras nº70 y 71 se muestran las calderas de biomasa y las de gas del polideportivo de Villablino.



Figura nº70. Caldera de biomasa del polideportivo de Villablino.



Figura nº71. Calderas de apoyo de gasoil en el polideportivo de Villablino (rojas).



#### **7.2.4.2. Estimación de distribución de la demanda del Polideportivo de Villablino**

##### **Demanda diaria del Polideportivo de Villablino**

Para conocer la demanda diaria del polideportivo de Villablino se ha observado la demanda de otros edificios de la misma tipología, es decir, de otros polideportivos ya que, según (Ma, Z., Li, H., Sun, Q., Wang, C., Yan, Ai. & Starfelt 2014), una de las maneras más eficaces de estimar los patrones de demanda de edificios, es categorizar el edificio por su uso.

En el proyecto de construcción de la red de calor a diferentes edificios en el entorno del pozo Fondón en Langreo (García-Carro, F.M. & Solís 2019) se estudió la distribución de la demanda del polideportivo Juan Carlos Beiro, el cual se ha utilizado de base para estimar el consumo diario de energía de calefacción del polideportivo de Villablino.

El consumo energético para calefacción tiene una punta importante sobre las 08:00 de la mañana cuando se pretenden caldear las instalaciones. Este consumo va decreciendo paulatinamente alcanzando un mínimo alrededor de las 14:30 coincidiendo con la hora de comer de los clientes y las horas de mayor radiación solar del día. Por la tarde se reanudan las actividades deportivas por lo que aumenta de nuevo la demanda energética quedando interrumpida durante la noche, desde las 20:00 hasta las 8:00 de la mañana.

Suponiendo que el sistema de calefacción existente actualmente está bien dimensionado, la caldera instalada será capaz de satisfacer la demanda máxima de las instalaciones con un margen de seguridad aceptable. En este estudio se desprecia ese margen de seguridad y se supone que la demanda máxima de las instalaciones es el total de la potencia instalada, por tanto, en la hora de mayor demanda de calefacción del año se demandarán 250 kWh.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº155:





| Cliente              | Polideportivo  |               |
|----------------------|----------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria |               |
| Demanda máxima (kWh) | 250,00         |               |
| Hora                 | Factor         | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0              | 0             |
| 1:00                 | 0              | 0             |
| 2:00                 | 0              | 0             |
| 3:00                 | 0              | 0             |
| 4:00                 | 0              | 0             |
| 5:00                 | 0              | 0             |
| 6:00                 | 0              | 0             |
| 7:00                 | 1              | 250           |
| 8:00                 | 0,8            | 200           |
| 9:00                 | 0,6            | 150           |
| 10:00                | 0,5            | 125           |
| 11:00                | 0,4            | 100           |
| 12:00                | 0,3            | 75            |
| 13:00                | 0,2            | 50            |
| 14:00                | 0,18           | 45            |
| 15:00                | 0,15           | 37,5          |
| 16:00                | 0,5            | 125           |
| 17:00                | 0,4            | 100           |
| 18:00                | 0,38           | 95            |
| 19:00                | 0,35           | 87,5          |
| 20:00                | 0,32           | 80            |
| 21:00                | 0              | 0             |
| 22:00                | 0              | 0             |
| 23:00                | 0              | 0             |

Tabla nº155. Demanda diaria estimada para el Polideportivo de Villablino.

### Demanda anual del Polideportivo de Villablino

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en el Polideportivo de Villablino con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Se ha considerado que todos los días de un mismo mes tienen la misma variación, sin embargo, habría que descontar los fines de semana en los que la demanda energética es nula.

Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1. En los meses de verano, aunque no exista demanda de calefacción, sí que existe



demanda de agua caliente sanitaria para los vestuarios, por lo tanto, se mantiene el consumo aplicándole un coeficiente de 0,2. Una vez más, los meses de tránsito (abril y octubre) se ponderan con un factor de 0,5.

En la tabla nº156 se muestran los factores utilizados para cada mes del año y la demanda horaria máxima por mes.

| Cliente              | Polideportivo |               |
|----------------------|---------------|---------------|
| Tipo de curva        | Anual-mensual |               |
| Demanda máxima (kWh) | 250           |               |
| Mes                  | Factor        | Demanda (kWh) |
| Enero                | 1             | 250           |
| Febrero              | 1             | 250           |
| Marzo                | 1             | 250           |
| Abril                | 0,5           | 125           |
| Mayo                 | 0,2           | 50            |
| Junio                | 0,2           | 50            |
| Julio                | 0,2           | 50            |
| Agosto               | 0,2           | 50            |
| Septiembre           | 0,2           | 50            |
| Octubre              | 0,5           | 125           |
| Noviembre            | 1             | 250           |
| Diciembre            | 1             | 250           |

Tabla nº156. Factores de ponderación mensuales de la demanda del Polideportivo de Villablino.

#### 7.2.5. Colegio público San Miguel

El colegio público San Miguel es una instalación educativa dependiente del Ayuntamiento de Villablino sita en la calle Omaña S/N 24100 Villablino, León.

Se trata de un edificio de cuatro alturas con una superficie construida aproximada de 765 m<sup>2</sup>, los cuales han sido medidos en un visor cartográfico. En la figura nº72 se muestra el edificio del colegio público San Miguel de Villablino.



Figura nº72. Instalaciones del CEIP San Miguel de Villablino.

#### ***7.2.5.1. Potencia instalada Colegio público San Miguel***

El colegio público San Miguel cuenta con una caldera de carbón de 176,7 kW para climatizar sus instalaciones, la cual tiene un rendimiento del 78%. En realidad, es un tipo de caldera que podría usar como combustible de alimentación gasoil o gas natural además de carbón, pero actualmente el combustible utilizado es sólido. En la figura nº73 se muestra una imagen de la caldera existente en el colegio público San Miguel.



Figura nº73. Caldera de la sala técnica del CEIP San Miguel de Villablino.

#### ***7.2.5.2. Estimación de distribución de la demanda Colegio público San Miguel***

##### **Demanda diaria del Colegio público San Miguel**

Los horarios de funcionamiento de los colegios pueden asemejarse a los de los institutos ya que las horas de actividad son prácticamente las mismas, por ello, se va a utilizar la misma gráfica diaria que se vio para el caso del IES Obispo Argüelles.

Suponiendo que el sistema de calefacción del colegio está bien dimensionado, la caldera instalada debería de ser capaz de satisfacer la demanda máxima con un margen de seguridad aceptable, por lo tanto, se va a suponer que la demanda máxima del edificio es el total de la potencia instalada, es decir, en la hora de mayor demanda de calefacción y ACS del año se demandará 176,7 kWh.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº157:



| Cliente              | CEIP San Miguel |               |
|----------------------|-----------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria  |               |
| Demanda máxima (kWh) | 176,7           |               |
| Hora                 | Factor          | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0               | 0             |
| 1:00                 | 0               | 0             |
| 2:00                 | 0               | 0             |
| 3:00                 | 0               | 0             |
| 4:00                 | 0               | 0             |
| 5:00                 | 0               | 0             |
| 6:00                 | 0               | 0             |
| 7:00                 | 1               | 176,7         |
| 8:00                 | 0,9             | 159,03        |
| 9:00                 | 0,8             | 141,36        |
| 10:00                | 0,7             | 123,69        |
| 11:00                | 0,6             | 106,02        |
| 12:00                | 0,5             | 88,35         |
| 13:00                | 0,45            | 79,515        |
| 14:00                | 0,4             | 70,68         |
| 15:00                | 0,35            | 61,845        |
| 16:00                | 0,3             | 53,01         |
| 17:00                | 0,3             | 53,01         |
| 18:00                | 0,35            | 61,845        |
| 19:00                | 0,4             | 70,68         |
| 20:00                | 0,45            | 79,515        |
| 21:00                | 0               | 0             |
| 22:00                | 0               | 0             |
| 23:00                | 0               | 0             |

Tabla nº157. Demanda diaria del Colegio público San Miguel.

### Demanda anual del Colegio público San Miguel

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en el Colegio público San Miguel con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Como viene siendo habitual, se ha considerado que todos los días de un mismo mes tienen la misma variación, sin embargo, habría que descontar los fines de semana en los que la demanda energética es nula.



Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1, mientras que en los meses de verano en los que el centro permanece cerrado la demanda es nula y por tanto tienen un coeficiente de 0. A los meses en los que no se estima consumo de calefacción pero que el centro no permanece cerrado se les ha aplicado un factor de 0,1 puesto que sigue habiendo demanda de ACS en los vestuarios. Abril y octubre se han tratado de forma similar a los casos anteriores.

En la tabla nº158 se muestran los factores utilizados para cada mes del año, así como la demanda máxima horaria que se puede dar mensualmente.

| <b>Ciente</b>               | <b>CEIP San Miguel</b> |                      |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| <b>Tipo de curva</b>        | <b>Anual-mensual</b>   |                      |
| <b>Demanda máxima (kWh)</b> | <b>176,7</b>           |                      |
| <b>Mes</b>                  | <b>Factor</b>          | <b>Demanda (kWh)</b> |
| Enero                       | 1                      | 176,7                |
| Febrero                     | 1                      | 176,7                |
| Marzo                       | 1                      | 176,7                |
| Abril                       | 0,5                    | 88,35                |
| Mayo                        | 0                      | 0                    |
| Junio                       | 0                      | 0                    |
| Julio                       | 0                      | 0                    |
| Agosto                      | 0                      | 0                    |
| Septiembre                  | 0                      | 0                    |
| Octubre                     | 0,5                    | 88,35                |
| Noviembre                   | 1                      | 176,7                |
| Diciembre                   | 1                      | 176,7                |

Tabla nº158. Factores de ponderación mensuales de la demanda del Colegio público San Miguel.

#### 7.2.6. Centro de salud Valle de Laciana

Este centro de salud es el complejo sanitario más importante de todo el Valle Laciana y se sitúa en la calle Ramón González Alegre, 10. CP 24100 Villablino (León). Tiene una superficie aproximada en planta de 3.660 m<sup>2</sup> que se multiplican en cada una de sus tres plantas. En la figura nº74 se muestra una vista del Centro de Salud Valle Laciana.



Figura nº74. Centro sociosanitario Valle de Laciana.

#### **7.2.6.1. Potencia instalada Centro de Salud Valle de Laciana**

Se realizó una visita a la sala técnica del centro de salud, pero no fue posible realizar fotografías dentro de la misma por indicaciones expresas de la dirección del centro. No obstante, sí que se pudo realizar un croquis de la sala técnica y se tuvo acceso a los datos más importantes de los equipos instalados en la misma.

La sala técnica cuenta con tres calderas de gasoil, de las cuáles sólo se utilizan dos a la vez quedando una de reserva. Dos de las calderas tienen una potencia nominal de 515,6 kW mientras que la de reserva tiene una potencia de 319,8 kW.

Los circuitos existentes en la sala técnica se describirán con más detalle en apartados posteriores.



### **7.2.6.2. Estimación de distribución de la demanda Centro de Salud Valle de Laciana**

#### **Demanda diaria del Centro de Salud Valle de Laciana**

Para conocer la demanda diaria del Centro de Salud Valle Laciana de Villablino se ha observado la demanda de otros edificios de la misma tipología, es decir, de otros complejos sanitarios, en concreto, el Centro de Salud de Langreo cuya estimación de demanda viene recogida en el proyecto de construcción de la red de calor del pozo Fondón en Langreo (García-Carro, F.M. & Solís 2019).

El consumo energético para calefacción tiene dos puntas significativas durante el día, por la mañana alrededor de las 8:00 y por la tarde, sobre las 18:30. No obstante, la punta de la mañana tiene una magnitud aproximadamente del doble que la primera, existiendo un valle en el entorno de las 14:00. Pasadas las 20:00 el consumo de calefacción se reduce mucho, aunque no se puede apagar del todo porque dentro del centro de salud hay salas que tienen que mantenerse con calefacción como son las urgencias.

Suponiendo que el sistema de calefacción existente está bien dimensionado, la caldera instalada sería capaz de satisfacer la demanda máxima de las instalaciones con un margen de seguridad aceptable. En este estudio se desprecia ese margen de seguridad y se supone que la demanda máxima de las instalaciones es el total de la potencia instalada, por tanto, en la hora de mayor demanda de calefacción del año se demandarán 1.031,2 kWh.

La demanda diaria de un día de invierno viene reflejada en la tabla nº159:





| Cliente              | Centro de Salud Valle Lacia |               |
|----------------------|-----------------------------|---------------|
| Tipo de curva        | Diaria-horaria              |               |
| Demanda máxima (kWh) | 1031,2                      |               |
| Hora                 | Factor                      | Demanda (kWh) |
| 0:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 1:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 2:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 3:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 4:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 5:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 6:00                 | 0,2                         | 206,24        |
| 7:00                 | 1                           | 1031,2        |
| 8:00                 | 0,7                         | 721,84        |
| 9:00                 | 0,65                        | 670,28        |
| 10:00                | 0,6                         | 618,72        |
| 11:00                | 0,55                        | 567,16        |
| 12:00                | 0,5                         | 515,6         |
| 13:00                | 0,4                         | 412,48        |
| 14:00                | 0,3                         | 309,36        |
| 15:00                | 0,28                        | 288,736       |
| 16:00                | 0,25                        | 257,8         |
| 17:00                | 0,3                         | 309,36        |
| 18:00                | 0,4                         | 412,48        |
| 19:00                | 0,5                         | 515,6         |
| 20:00                | 0,2                         | 206,24        |
| 21:00                | 0,2                         | 206,24        |
| 22:00                | 0,2                         | 206,24        |
| 23:00                | 0,2                         | 206,24        |

Tabla nº159. Demanda diaria del Centro de Salud Valle Lacia.

### Demanda anual del Centro de Salud Valle Lacia

También se ha evaluado la variación anual de la demanda en el Centro de Salud Valle Lacia con el fin de poder estudiar la demanda anual de la red de calor teniendo en cuenta todos los clientes a la vez.

Se han tenido en cuenta los supuestos de casos anteriores para los días de un mismo mes.

Los valores máximos se registran en los meses de invierno y se les ha aplicado un coeficiente de 1. En los meses de verano, aunque no exista demanda de calefacción, sí que existe demanda de agua caliente sanitaria para los vestuarios y diversos servicios sanitarios, por lo tanto, se mantiene el consumo aplicándole un coeficiente de 0,3.



En la tabla nº160 se muestran los factores utilizados para cada mes del año, así como la demanda horaria por mes.

| Cliente              | Centro de Salud Valle Laciana |               |
|----------------------|-------------------------------|---------------|
| Tipo de curva        | Anual-mensual                 |               |
| Demanda máxima (kWh) | 1031,2                        |               |
| Mes                  | Factor                        | Demanda (kWh) |
| Enero                | 1                             | 1031,2        |
| Febrero              | 1                             | 1031,2        |
| Marzo                | 1                             | 1031,2        |
| Abril                | 0,75                          | 773,4         |
| Mayo                 | 0,5                           | 515,6         |
| Junio                | 0,3                           | 309,36        |
| Julio                | 0,3                           | 309,36        |
| Agosto               | 0,3                           | 309,36        |
| Septiembre           | 0,5                           | 515,6         |
| Octubre              | 0,75                          | 773,4         |
| Noviembre            | 1                             | 1031,2        |
| Diciembre            | 1                             | 1031,2        |

Tabla nº160. Factores de ponderación mensuales de la demanda del Centro de Salud Valle Laciana.

### 7.2.7. Estudio de la demanda del sistema

El estudio particularizado de cada cliente sirve para poder definir la demanda del sistema calorífico una vez se aglutinen todos ellos, teniendo en cuenta que la demanda de cada cliente puede solaparse con el resto dependiendo del consumo interno del mismo.

#### 7.2.7.1. Demanda total de la red de calor de Villablino

En los estudios individuales de demanda se ha considerado dos simplificaciones:

- Todos los días del año tienen la misma curva de demanda (se deben excluir los fines de semana en las instalaciones que permanezcan cerradas en ese tiempo).
- Todos los días de un mes tienen los mismos valores de demanda, cambiando de un mes a otro en función de un factor de ponderación definido anteriormente.

De esta manera se consigue simplificar razonablemente la información obtenida para poder estudiar la demanda total de la red de calor conjuntamente.



En la tabla nº161 se recogen los valores de la demanda horaria máxima de cada uno de los clientes y el valor total del sistema, correspondiente a la suma de los anteriores:

| Demanda máxima por mes en el sistema (kWh) |                  |              |                    |             |                 |                 |          |
|--|------------------|--------------|--------------------|-------------|-----------------|-----------------|----------|
| Mes  | Obispo Argüelles | Ayuntamiento | Casa de la Cultura | Polideport. | CEIP San Miguel | Centro de Salud | Total    |
| Enero                                      | 734,50           | 127,20       | 107,18             | 250,00      | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |
| Febrero                                    | 734,50           | 127,20       | 107,18             | 250,00      | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |
| Marzo                                      | 514,15           | 127,20       | 107,18             | 250,00      | 176,70          | 1.031,20        | 2.206,43 |
| Abril                                      | 367,25           | 63,60        | 53,59              | 125,00      | 88,35           | 773,40          | 1.471,19 |
| Mayo                                       | 73,45            | 0,00         | 0,00               | 50,00       | 0,00            | 515,60          | 639,05   |
| Junio                                      | 73,45            | 0,00         | 0,00               | 50,00       | 0,00            | 309,36          | 432,81   |
| Julio                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 50,00       | 0,00            | 309,36          | 359,36   |
| Agosto                                     | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 50,00       | 0,00            | 309,36          | 359,36   |
| Septiembre                                 | 73,45            | 0,00         | 0,00               | 50,00       | 0,00            | 515,60          | 639,05   |
| Octubre                                    | 367,25           | 63,60        | 53,59              | 125,00      | 88,35           | 773,40          | 1.471,19 |
| Noviembre                                  | 587,60           | 127,20       | 107,18             | 250,00      | 176,70          | 1.031,20        | 2.279,88 |
| Diciembre                                  | 734,50           | 127,20       | 107,18             | 250,00      | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |

Tabla nº161. Demanda horaria máxima por mes del sistema de la red de calor de Villablino.

Como se puede ver en la columna de la derecha el sistema en su conjunto demandará 2.426,78 kWh en la hora de mayor demanda, considerando que se conectan a la red todos los clientes. Esto se dará en un día de invierno a las 7:00 de la mañana ya que es la hora en la que se producen las puntas de demanda de todos los clientes.

La tabla nº161 se expresa en forma de gráficos en las figuras nº75, donde se representan los máximos de la demanda horaria por meses, y nº76, donde se representa la situación en la que todos los clientes demanden el máximo del mes en la misma hora:

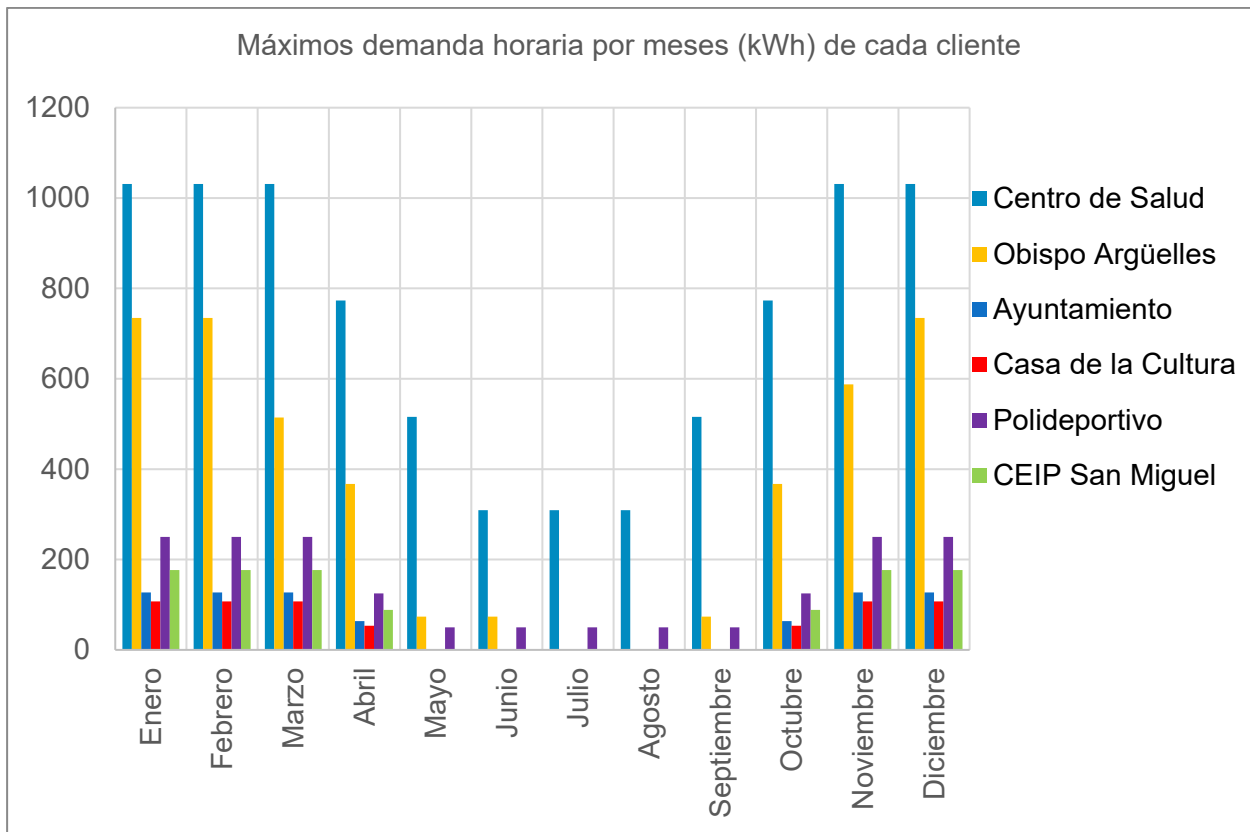


Figura nº75. Demanda horaria máxima por mes de los clientes de la red de calor de Villablino.

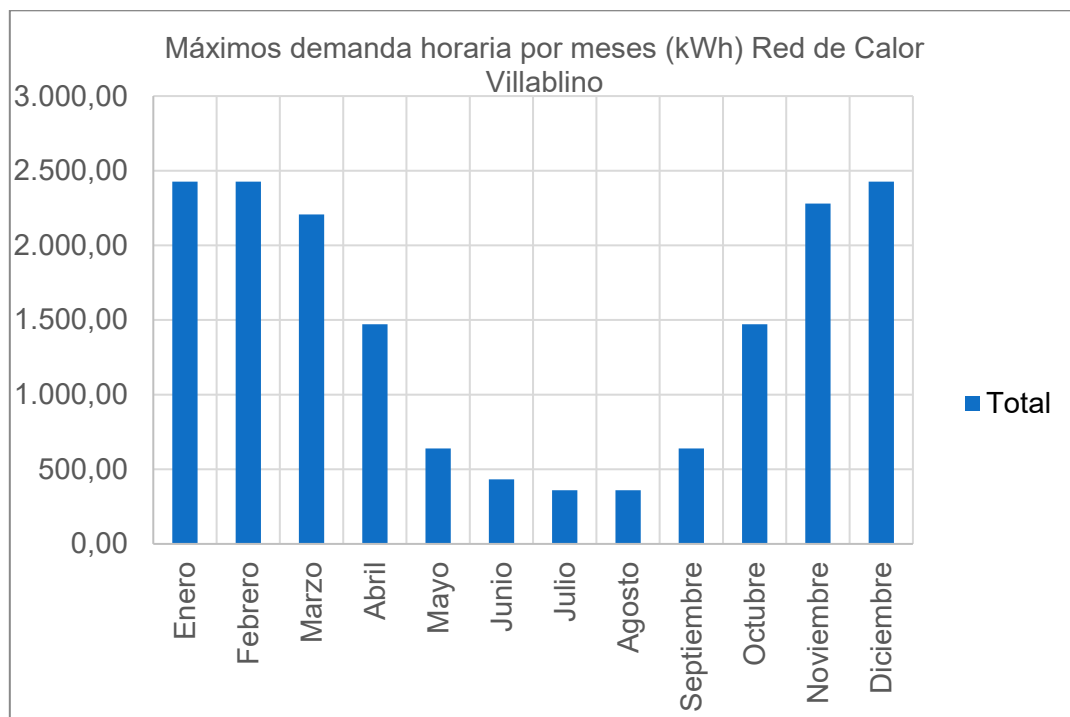


Figura nº76. Demanda horaria máxima por mes del sistema de la red de calor de Villablino.



También se ha estudiado la simultaneidad de demanda entre clientes en un día de invierno, recopilada en la tabla nº162.

| Demanda día de invierno (kWh) por cliente |                  |              |                    |               |                 |                 |          |
|---|------------------|--------------|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|----------|
| Hora                                      | Obispo Argüelles | Ayuntamiento | Casa de la Cultura | Polideportivo | CEIP San Miguel | Centro de Salud | Total    |
| 0:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 1:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 2:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 3:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 4:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 5:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 6:00                                      | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 7:00                                      | 734,50           | 127,20       | 107,18             | 250,00        | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |
| 8:00                                      | 661,05           | 114,48       | 96,46              | 200,00        | 159,03          | 721,84          | 1.952,86 |
| 9:00                                      | 587,60           | 101,76       | 85,74              | 150,00        | 141,36          | 670,28          | 1.736,74 |
| 10:00                                     | 514,15           | 89,04        | 75,02              | 125,00        | 123,69          | 618,72          | 1.545,62 |
| 11:00                                     | 440,70           | 76,32        | 64,31              | 100,00        | 106,02          | 567,16          | 1.354,51 |
| 12:00                                     | 367,25           | 63,60        | 53,59              | 75,00         | 88,35           | 515,60          | 1.163,39 |
| 13:00                                     | 330,53           | 57,24        | 48,23              | 50,00         | 79,52           | 412,48          | 977,99   |
| 14:00                                     | 293,80           | 50,88        | 42,87              | 45,00         | 70,68           | 309,36          | 812,59   |
| 15:00                                     | 257,08           | 44,52        | 37,51              | 37,50         | 61,85           | 288,74          | 727,19   |
| 16:00                                     | 220,35           | 38,16        | 32,15              | 125,00        | 53,01           | 257,80          | 726,47   |
| 17:00                                     | 220,35           | 0,00         | 32,15              | 100,00        | 53,01           | 309,36          | 714,87   |
| 18:00                                     | 257,08           | 0,00         | 37,51              | 95,00         | 61,85           | 412,48          | 863,91   |
| 19:00                                     | 293,80           | 0,00         | 42,87              | 87,50         | 70,68           | 515,60          | 1.010,45 |
| 20:00                                     | 330,53           | 0,00         | 48,23              | 80,00         | 79,52           | 206,24          | 744,51   |
| 21:00                                     | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 22:00                                     | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| 23:00                                     | 0,00             | 0,00         | 0,00               | 0,00          | 0,00            | 206,24          | 206,24   |

Tabla nº162. Distribución de la demanda horaria en un día del sistema de la red de calor de Villablino.

En la tabla nº162 se pueden comparar las distribuciones diarias de las demandas de cada uno de los clientes integrados en la red de calor de Villablino. Se observa que el único cliente que tiene demanda durante todo el día es el centro de salud Valle Laciana mientras que el resto tienen un horario de demanda de 07:00 a 20:00 exceptuando el edificio del Ayuntamiento que es de 7:00 a 16:00.

Se comprueba también que la demanda máxima es de 2.426,78 kWh entre las 07:00 y las 08:00 de la mañana debido a que todos los clientes tienen su punta de consumo a esa hora.



En la figura nº77 se muestra la demanda de un día de invierno de todos los posibles clientes.

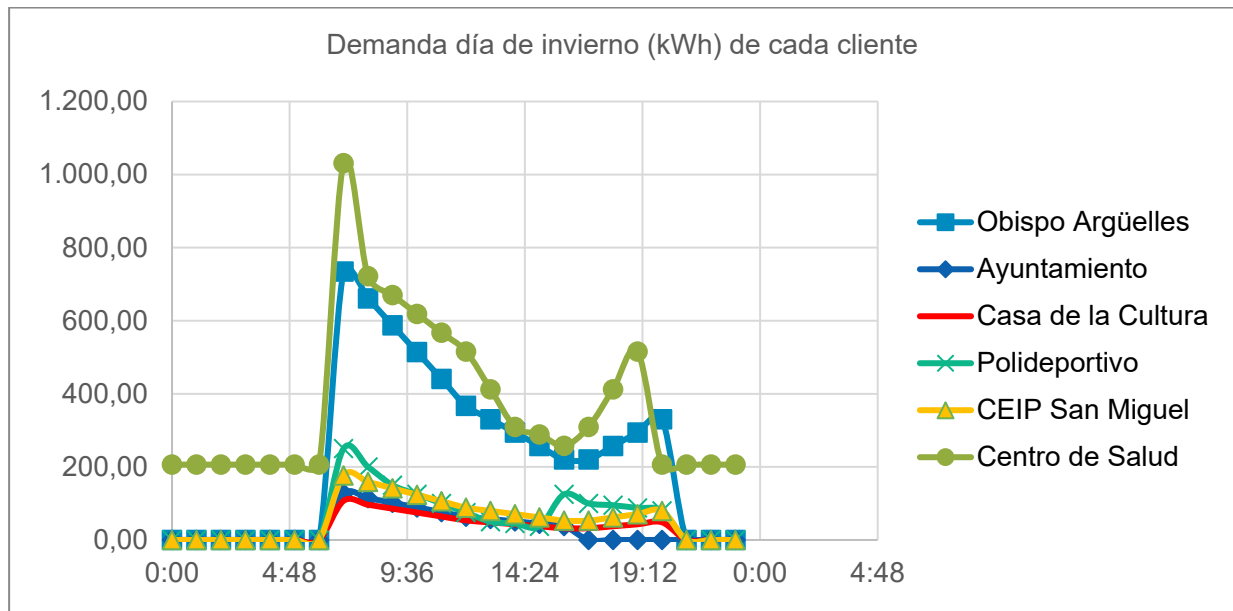


Figura nº77. Distribución de la demanda horaria en un día de los clientes de la red de calor de Villablino.

En la figura nº78 se muestra la envolvente de demanda en un día de todo el sistema:

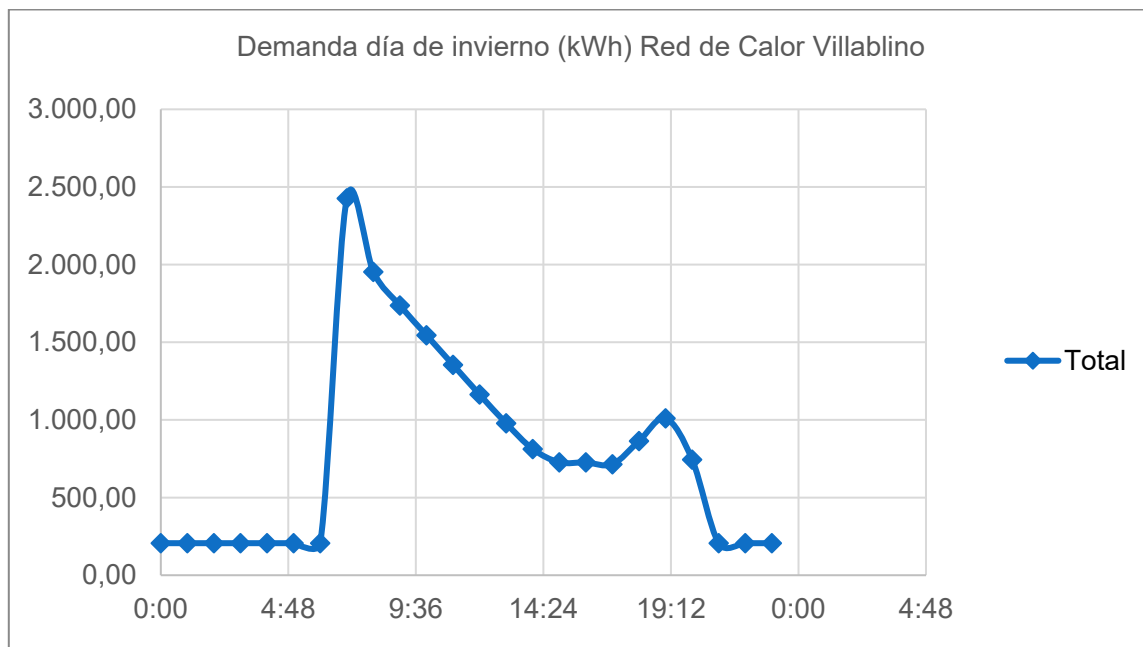


Figura nº78. Distribución de la demanda horaria en un día de la red de calor de Villablino.

Como conclusión de este apartado es que la hora de mayor demanda del sistema se da entre las 7:00 y las 8:00 de la mañana en los días de invierno y su valor es de 2.426,78 kWh.



### 7.2.7.2. Demanda horaria durante todos los meses del año

Se muestra en la tabla nº163 la demanda horaria en el día 1 de cada mes, a lo largo del año. Como se ha tomado la simplificación de que todos los días del mes se tiene la misma demanda (exceptuando los fines de semana ya que hay clientes cuya demanda durante los fines de semana es de 0 kWh), estos valores son representativos para todos los días del año, completándose así el estudio horario de la demanda anual.

| Demanda día anual (kWh) por cliente |                  |                  |        |                    |          |                 |                 |          |
|-------------------------------------|------------------|------------------|--------|--------------------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| Mes                                 | Hora             | Obispo Argüelles | Ayunt. | Casa de la Cultura | Polidep. | CEIP San Miguel | Centro de Salud | Total    |
| Enero                               | 01/01/2020 0:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 1:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 2:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 3:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 4:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 5:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 6:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 7:00  | 734,50           | 127,20 | 107,18             | 250,00   | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |
| Enero                               | 01/01/2020 8:00  | 661,05           | 114,48 | 96,46              | 200,00   | 159,03          | 721,84          | 1.952,86 |
| Enero                               | 01/01/2020 9:00  | 587,60           | 101,76 | 85,74              | 150,00   | 141,36          | 670,28          | 1.736,74 |
| Enero                               | 01/01/2020 10:00 | 514,15           | 89,04  | 75,02              | 125,00   | 123,69          | 618,72          | 1.545,62 |
| Enero                               | 01/01/2020 11:00 | 440,70           | 76,32  | 64,31              | 100,00   | 106,02          | 567,16          | 1.354,51 |
| Enero                               | 01/01/2020 12:00 | 367,25           | 63,60  | 53,59              | 75,00    | 88,35           | 515,60          | 1.163,39 |
| Enero                               | 01/01/2020 13:00 | 330,53           | 57,24  | 48,23              | 50,00    | 79,52           | 412,48          | 977,99   |
| Enero                               | 01/01/2020 14:00 | 293,80           | 50,88  | 42,87              | 45,00    | 70,68           | 309,36          | 812,59   |
| Enero                               | 01/01/2020 15:00 | 257,08           | 44,52  | 37,51              | 37,50    | 61,85           | 288,74          | 727,19   |
| Enero                               | 01/01/2020 16:00 | 220,35           | 38,16  | 32,15              | 125,00   | 53,01           | 257,80          | 726,47   |
| Enero                               | 01/01/2020 17:00 | 220,35           | 0,00   | 32,15              | 100,00   | 53,01           | 309,36          | 714,87   |
| Enero                               | 01/01/2020 18:00 | 257,08           | 0,00   | 37,51              | 95,00    | 61,85           | 412,48          | 863,91   |
| Enero                               | 01/01/2020 19:00 | 293,80           | 0,00   | 42,87              | 87,50    | 70,68           | 515,60          | 1.010,45 |
| Enero                               | 01/01/2020 20:00 | 330,53           | 0,00   | 48,23              | 80,00    | 79,52           | 206,24          | 744,51   |
| Enero                               | 01/01/2020 21:00 | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 22:00 | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Enero                               | 01/01/2020 23:00 | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 0:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 1:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 2:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 3:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 4:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 5:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 6:00  | 0,00             | 0,00   | 0,00               | 0,00     | 0,00            | 206,24          | 206,24   |
| Febrero                             | 01/02/2020 7:00  | 734,50           | 127,20 | 107,18             | 250,00   | 176,70          | 1.031,20        | 2.426,78 |



|         |                  |        |        |        |        |        |          |          |
|---------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Febrero | 01/02/2020 8:00  | 661,05 | 114,48 | 96,46  | 200,00 | 159,03 | 721,84   | 1.952,86 |
| Febrero | 01/02/2020 9:00  | 587,60 | 101,76 | 85,74  | 150,00 | 141,36 | 670,28   | 1.736,74 |
| Febrero | 01/02/2020 10:00 | 514,15 | 89,04  | 75,02  | 125,00 | 123,69 | 618,72   | 1.545,62 |
| Febrero | 01/02/2020 11:00 | 440,70 | 76,32  | 64,31  | 100,00 | 106,02 | 567,16   | 1.354,51 |
| Febrero | 01/02/2020 12:00 | 367,25 | 63,60  | 53,59  | 75,00  | 88,35  | 515,60   | 1.163,39 |
| Febrero | 01/02/2020 13:00 | 330,53 | 57,24  | 48,23  | 50,00  | 79,52  | 412,48   | 977,99   |
| Febrero | 01/02/2020 14:00 | 293,80 | 50,88  | 42,87  | 45,00  | 70,68  | 309,36   | 812,59   |
| Febrero | 01/02/2020 15:00 | 257,08 | 44,52  | 37,51  | 37,50  | 61,85  | 288,74   | 727,19   |
| Febrero | 01/02/2020 16:00 | 220,35 | 38,16  | 32,15  | 125,00 | 53,01  | 257,80   | 726,47   |
| Febrero | 01/02/2020 17:00 | 220,35 | 0,00   | 32,15  | 100,00 | 53,01  | 309,36   | 714,87   |
| Febrero | 01/02/2020 18:00 | 257,08 | 0,00   | 37,51  | 95,00  | 61,85  | 412,48   | 863,91   |
| Febrero | 01/02/2020 19:00 | 293,80 | 0,00   | 42,87  | 87,50  | 70,68  | 515,60   | 1.010,45 |
| Febrero | 01/02/2020 20:00 | 330,53 | 0,00   | 48,23  | 80,00  | 79,52  | 206,24   | 744,51   |
| Febrero | 01/02/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Febrero | 01/02/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Febrero | 01/02/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 0:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 1:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 2:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 3:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 4:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 5:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 6:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 7:00  | 514,15 | 127,20 | 107,18 | 250,00 | 176,70 | 1.031,20 | 2.206,43 |
| Marzo   | 01/03/2020 8:00  | 462,74 | 114,48 | 96,46  | 200,00 | 159,03 | 721,84   | 1.754,54 |
| Marzo   | 01/03/2020 9:00  | 411,32 | 101,76 | 85,74  | 150,00 | 141,36 | 670,28   | 1.560,46 |
| Marzo   | 01/03/2020 10:00 | 359,91 | 89,04  | 75,02  | 125,00 | 123,69 | 618,72   | 1.391,38 |
| Marzo   | 01/03/2020 11:00 | 308,49 | 76,32  | 64,31  | 100,00 | 106,02 | 567,16   | 1.222,30 |
| Marzo   | 01/03/2020 12:00 | 257,08 | 63,60  | 53,59  | 75,00  | 88,35  | 515,60   | 1.053,21 |
| Marzo   | 01/03/2020 13:00 | 231,37 | 57,24  | 48,23  | 50,00  | 79,52  | 412,48   | 878,83   |
| Marzo   | 01/03/2020 14:00 | 205,66 | 50,88  | 42,87  | 45,00  | 70,68  | 309,36   | 724,45   |
| Marzo   | 01/03/2020 15:00 | 179,95 | 44,52  | 37,51  | 37,50  | 61,85  | 288,74   | 650,07   |
| Marzo   | 01/03/2020 16:00 | 154,25 | 38,16  | 32,15  | 125,00 | 53,01  | 257,80   | 660,37   |
| Marzo   | 01/03/2020 17:00 | 154,25 | 0,00   | 32,15  | 100,00 | 53,01  | 309,36   | 648,77   |
| Marzo   | 01/03/2020 18:00 | 179,95 | 0,00   | 37,51  | 95,00  | 61,85  | 412,48   | 786,79   |
| Marzo   | 01/03/2020 19:00 | 205,66 | 0,00   | 42,87  | 87,50  | 70,68  | 515,60   | 922,31   |
| Marzo   | 01/03/2020 20:00 | 231,37 | 0,00   | 48,23  | 80,00  | 79,52  | 206,24   | 645,35   |
| Marzo   | 01/03/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Marzo   | 01/03/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Abril   | 01/04/2020 0:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Abril   | 01/04/2020 1:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Abril   | 01/04/2020 2:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Abril   | 01/04/2020 3:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Abril   | 01/04/2020 4:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |





|       |                  |        |       |       |        |       |        |          |
|-------|------------------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|----------|
| Abril | 01/04/2020 5:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 154,68 | 154,68   |
| Abril | 01/04/2020 6:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 154,68 | 154,68   |
| Abril | 01/04/2020 7:00  | 367,25 | 63,60 | 53,59 | 125,00 | 88,35 | 773,40 | 1.471,19 |
| Abril | 01/04/2020 8:00  | 330,53 | 57,24 | 48,23 | 100,00 | 79,52 | 541,38 | 1.156,89 |
| Abril | 01/04/2020 9:00  | 293,80 | 50,88 | 42,87 | 75,00  | 70,68 | 502,71 | 1.035,94 |
| Abril | 01/04/2020 10:00 | 257,08 | 44,52 | 37,51 | 62,50  | 61,85 | 464,04 | 927,49   |
| Abril | 01/04/2020 11:00 | 220,35 | 38,16 | 32,15 | 50,00  | 53,01 | 425,37 | 819,04   |
| Abril | 01/04/2020 12:00 | 183,63 | 31,80 | 26,79 | 37,50  | 44,18 | 386,70 | 710,59   |
| Abril | 01/04/2020 13:00 | 165,26 | 28,62 | 24,11 | 25,00  | 39,76 | 309,36 | 592,11   |
| Abril | 01/04/2020 14:00 | 146,90 | 25,44 | 21,44 | 22,50  | 35,34 | 232,02 | 483,64   |
| Abril | 01/04/2020 15:00 | 128,54 | 22,26 | 18,76 | 18,75  | 30,92 | 216,55 | 435,78   |
| Abril | 01/04/2020 16:00 | 110,18 | 19,08 | 16,08 | 62,50  | 26,51 | 193,35 | 427,69   |
| Abril | 01/04/2020 17:00 | 110,18 | 0,00  | 16,08 | 50,00  | 26,51 | 232,02 | 434,78   |
| Abril | 01/04/2020 18:00 | 128,54 | 0,00  | 18,76 | 47,50  | 30,92 | 309,36 | 535,08   |
| Abril | 01/04/2020 19:00 | 146,90 | 0,00  | 21,44 | 43,75  | 35,34 | 386,70 | 634,13   |
| Abril | 01/04/2020 20:00 | 165,26 | 0,00  | 24,11 | 40,00  | 39,76 | 154,68 | 423,81   |
| Abril | 01/04/2020 21:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 154,68 | 154,68   |
| Abril | 01/04/2020 22:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 154,68 | 154,68   |
| Abril | 01/04/2020 23:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 154,68 | 154,68   |
| Mayo  | 01/05/2020 0:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 1:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 2:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 3:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 4:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 5:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 6:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 7:00  | 73,45  | 0,00  | 0,00  | 50,00  | 0,00  | 515,60 | 639,05   |
| Mayo  | 01/05/2020 8:00  | 66,11  | 0,00  | 0,00  | 40,00  | 0,00  | 360,92 | 467,03   |
| Mayo  | 01/05/2020 9:00  | 58,76  | 0,00  | 0,00  | 30,00  | 0,00  | 335,14 | 423,90   |
| Mayo  | 01/05/2020 10:00 | 51,42  | 0,00  | 0,00  | 25,00  | 0,00  | 309,36 | 385,78   |
| Mayo  | 01/05/2020 11:00 | 44,07  | 0,00  | 0,00  | 20,00  | 0,00  | 283,58 | 347,65   |
| Mayo  | 01/05/2020 12:00 | 36,73  | 0,00  | 0,00  | 15,00  | 0,00  | 257,80 | 309,53   |
| Mayo  | 01/05/2020 13:00 | 33,05  | 0,00  | 0,00  | 10,00  | 0,00  | 206,24 | 249,29   |
| Mayo  | 01/05/2020 14:00 | 29,38  | 0,00  | 0,00  | 9,00   | 0,00  | 154,68 | 193,06   |
| Mayo  | 01/05/2020 15:00 | 25,71  | 0,00  | 0,00  | 7,50   | 0,00  | 144,37 | 177,58   |
| Mayo  | 01/05/2020 16:00 | 22,04  | 0,00  | 0,00  | 25,00  | 0,00  | 128,90 | 175,94   |
| Mayo  | 01/05/2020 17:00 | 22,04  | 0,00  | 0,00  | 20,00  | 0,00  | 154,68 | 196,72   |
| Mayo  | 01/05/2020 18:00 | 25,71  | 0,00  | 0,00  | 19,00  | 0,00  | 206,24 | 250,95   |
| Mayo  | 01/05/2020 19:00 | 29,38  | 0,00  | 0,00  | 17,50  | 0,00  | 257,80 | 304,68   |
| Mayo  | 01/05/2020 20:00 | 33,05  | 0,00  | 0,00  | 16,00  | 0,00  | 103,12 | 152,17   |
| Mayo  | 01/05/2020 21:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 22:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Mayo  | 01/05/2020 23:00 | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 103,12 | 103,12   |
| Junio | 01/06/2020 0:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 61,87  | 61,87    |
| Junio | 01/06/2020 1:00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 61,87  | 61,87    |



|       |                  |       |      |      |       |      |        |        |
|-------|------------------|-------|------|------|-------|------|--------|--------|
| Junio | 01/06/2020 2:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 3:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 4:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 5:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 6:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 7:00  | 73,45 | 0,00 | 0,00 | 50,00 | 0,00 | 309,36 | 432,81 |
| Junio | 01/06/2020 8:00  | 66,11 | 0,00 | 0,00 | 40,00 | 0,00 | 216,55 | 322,66 |
| Junio | 01/06/2020 9:00  | 58,76 | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 | 201,08 | 289,84 |
| Junio | 01/06/2020 10:00 | 51,42 | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 185,62 | 262,03 |
| Junio | 01/06/2020 11:00 | 44,07 | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 170,15 | 234,22 |
| Junio | 01/06/2020 12:00 | 36,73 | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 0,00 | 154,68 | 206,41 |
| Junio | 01/06/2020 13:00 | 33,05 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 123,74 | 166,80 |
| Junio | 01/06/2020 14:00 | 29,38 | 0,00 | 0,00 | 9,00  | 0,00 | 92,81  | 131,19 |
| Junio | 01/06/2020 15:00 | 25,71 | 0,00 | 0,00 | 7,50  | 0,00 | 86,62  | 119,83 |
| Junio | 01/06/2020 16:00 | 22,04 | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 77,34  | 124,38 |
| Junio | 01/06/2020 17:00 | 22,04 | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 92,81  | 134,84 |
| Junio | 01/06/2020 18:00 | 25,71 | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 0,00 | 123,74 | 168,45 |
| Junio | 01/06/2020 19:00 | 29,38 | 0,00 | 0,00 | 17,50 | 0,00 | 154,68 | 201,56 |
| Junio | 01/06/2020 20:00 | 33,05 | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 0,00 | 61,87  | 110,92 |
| Junio | 01/06/2020 21:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 22:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Junio | 01/06/2020 23:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 0:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 1:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 2:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 3:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 4:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 5:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 6:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 7:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 50,00 | 0,00 | 309,36 | 359,36 |
| Julio | 01/07/2020 8:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 40,00 | 0,00 | 216,55 | 256,55 |
| Julio | 01/07/2020 9:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 | 201,08 | 231,08 |
| Julio | 01/07/2020 10:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 185,62 | 210,62 |
| Julio | 01/07/2020 11:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 170,15 | 190,15 |
| Julio | 01/07/2020 12:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 0,00 | 154,68 | 169,68 |
| Julio | 01/07/2020 13:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 123,74 | 133,74 |
| Julio | 01/07/2020 14:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 9,00  | 0,00 | 92,81  | 101,81 |
| Julio | 01/07/2020 15:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 7,50  | 0,00 | 86,62  | 94,12  |
| Julio | 01/07/2020 16:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 77,34  | 102,34 |
| Julio | 01/07/2020 17:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 92,81  | 112,81 |
| Julio | 01/07/2020 18:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 0,00 | 123,74 | 142,74 |
| Julio | 01/07/2020 19:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 17,50 | 0,00 | 154,68 | 172,18 |
| Julio | 01/07/2020 20:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 0,00 | 61,87  | 77,87  |
| Julio | 01/07/2020 21:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Julio | 01/07/2020 22:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |



|            |                  |       |      |      |       |      |        |        |
|------------|------------------|-------|------|------|-------|------|--------|--------|
| Julio      | 01/07/2020 23:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 0:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 1:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 2:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 3:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 4:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 5:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 6:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 7:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 50,00 | 0,00 | 309,36 | 359,36 |
| Agosto     | 01/08/2020 8:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 40,00 | 0,00 | 216,55 | 256,55 |
| Agosto     | 01/08/2020 9:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 | 201,08 | 231,08 |
| Agosto     | 01/08/2020 10:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 185,62 | 210,62 |
| Agosto     | 01/08/2020 11:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 170,15 | 190,15 |
| Agosto     | 01/08/2020 12:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 0,00 | 154,68 | 169,68 |
| Agosto     | 01/08/2020 13:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 123,74 | 133,74 |
| Agosto     | 01/08/2020 14:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 9,00  | 0,00 | 92,81  | 101,81 |
| Agosto     | 01/08/2020 15:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 7,50  | 0,00 | 86,62  | 94,12  |
| Agosto     | 01/08/2020 16:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 77,34  | 102,34 |
| Agosto     | 01/08/2020 17:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 92,81  | 112,81 |
| Agosto     | 01/08/2020 18:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 0,00 | 123,74 | 142,74 |
| Agosto     | 01/08/2020 19:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 17,50 | 0,00 | 154,68 | 172,18 |
| Agosto     | 01/08/2020 20:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 16,00 | 0,00 | 61,87  | 77,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 21:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 22:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Agosto     | 01/08/2020 23:00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 61,87  | 61,87  |
| Septiembre | 01/09/2020 0:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 1:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 2:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 3:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 4:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 5:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 6:00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 103,12 | 103,12 |
| Septiembre | 01/09/2020 7:00  | 73,45 | 0,00 | 0,00 | 50,00 | 0,00 | 515,60 | 639,05 |
| Septiembre | 01/09/2020 8:00  | 66,11 | 0,00 | 0,00 | 40,00 | 0,00 | 360,92 | 467,03 |
| Septiembre | 01/09/2020 9:00  | 58,76 | 0,00 | 0,00 | 30,00 | 0,00 | 335,14 | 423,90 |
| Septiembre | 01/09/2020 10:00 | 51,42 | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 309,36 | 385,78 |
| Septiembre | 01/09/2020 11:00 | 44,07 | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 283,58 | 347,65 |
| Septiembre | 01/09/2020 12:00 | 36,73 | 0,00 | 0,00 | 15,00 | 0,00 | 257,80 | 309,53 |
| Septiembre | 01/09/2020 13:00 | 33,05 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 206,24 | 249,29 |
| Septiembre | 01/09/2020 14:00 | 29,38 | 0,00 | 0,00 | 9,00  | 0,00 | 154,68 | 193,06 |
| Septiembre | 01/09/2020 15:00 | 25,71 | 0,00 | 0,00 | 7,50  | 0,00 | 144,37 | 177,58 |
| Septiembre | 01/09/2020 16:00 | 22,04 | 0,00 | 0,00 | 25,00 | 0,00 | 128,90 | 175,94 |
| Septiembre | 01/09/2020 17:00 | 22,04 | 0,00 | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 154,68 | 196,72 |
| Septiembre | 01/09/2020 18:00 | 25,71 | 0,00 | 0,00 | 19,00 | 0,00 | 206,24 | 250,95 |
| Septiembre | 01/09/2020 19:00 | 29,38 | 0,00 | 0,00 | 17,50 | 0,00 | 257,80 | 304,68 |



|            |                  |        |        |        |        |        |          |          |
|------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Septiembre | 01/09/2020 20:00 | 33,05  | 0,00   | 0,00   | 16,00  | 0,00   | 103,12   | 152,17   |
| Septiembre | 01/09/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 103,12   | 103,12   |
| Septiembre | 01/09/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 103,12   | 103,12   |
| Septiembre | 01/09/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 103,12   | 103,12   |
| Octubre    | 01/10/2020 0:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 1:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 2:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 3:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 4:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 5:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 6:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 7:00  | 367,25 | 63,60  | 53,59  | 125,00 | 88,35  | 773,40   | 1.471,19 |
| Octubre    | 01/10/2020 8:00  | 330,53 | 57,24  | 48,23  | 100,00 | 79,52  | 541,38   | 1.156,89 |
| Octubre    | 01/10/2020 9:00  | 293,80 | 50,88  | 42,87  | 75,00  | 70,68  | 502,71   | 1.035,94 |
| Octubre    | 01/10/2020 10:00 | 257,08 | 44,52  | 37,51  | 62,50  | 61,85  | 464,04   | 927,49   |
| Octubre    | 01/10/2020 11:00 | 220,35 | 38,16  | 32,15  | 50,00  | 53,01  | 425,37   | 819,04   |
| Octubre    | 01/10/2020 12:00 | 183,63 | 31,80  | 26,79  | 37,50  | 44,18  | 386,70   | 710,59   |
| Octubre    | 01/10/2020 13:00 | 165,26 | 28,62  | 24,11  | 25,00  | 39,76  | 309,36   | 592,11   |
| Octubre    | 01/10/2020 14:00 | 146,90 | 25,44  | 21,44  | 22,50  | 35,34  | 232,02   | 483,64   |
| Octubre    | 01/10/2020 15:00 | 128,54 | 22,26  | 18,76  | 18,75  | 30,92  | 216,55   | 435,78   |
| Octubre    | 01/10/2020 16:00 | 110,18 | 19,08  | 16,08  | 62,50  | 26,51  | 193,35   | 427,69   |
| Octubre    | 01/10/2020 17:00 | 110,18 | 0,00   | 16,08  | 50,00  | 26,51  | 232,02   | 434,78   |
| Octubre    | 01/10/2020 18:00 | 128,54 | 0,00   | 18,76  | 47,50  | 30,92  | 309,36   | 535,08   |
| Octubre    | 01/10/2020 19:00 | 146,90 | 0,00   | 21,44  | 43,75  | 35,34  | 386,70   | 634,13   |
| Octubre    | 01/10/2020 20:00 | 165,26 | 0,00   | 24,11  | 40,00  | 39,76  | 154,68   | 423,81   |
| Octubre    | 01/10/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Octubre    | 01/10/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 154,68   | 154,68   |
| Noviembre  | 01/11/2020 0:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 1:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 2:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 3:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 4:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 5:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 6:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre  | 01/11/2020 7:00  | 587,60 | 127,20 | 107,18 | 250,00 | 176,70 | 1.031,20 | 2.279,88 |
| Noviembre  | 01/11/2020 8:00  | 528,84 | 114,48 | 96,46  | 200,00 | 159,03 | 721,84   | 1.820,65 |
| Noviembre  | 01/11/2020 9:00  | 470,08 | 101,76 | 85,74  | 150,00 | 141,36 | 670,28   | 1.619,22 |
| Noviembre  | 01/11/2020 10:00 | 411,32 | 89,04  | 75,02  | 125,00 | 123,69 | 618,72   | 1.442,79 |
| Noviembre  | 01/11/2020 11:00 | 352,56 | 76,32  | 64,31  | 100,00 | 106,02 | 567,16   | 1.266,37 |
| Noviembre  | 01/11/2020 12:00 | 293,80 | 63,60  | 53,59  | 75,00  | 88,35  | 515,60   | 1.089,94 |
| Noviembre  | 01/11/2020 13:00 | 264,42 | 57,24  | 48,23  | 50,00  | 79,52  | 412,48   | 911,88   |
| Noviembre  | 01/11/2020 14:00 | 235,04 | 50,88  | 42,87  | 45,00  | 70,68  | 309,36   | 753,83   |
| Noviembre  | 01/11/2020 15:00 | 205,66 | 44,52  | 37,51  | 37,50  | 61,85  | 288,74   | 675,77   |
| Noviembre  | 01/11/2020 16:00 | 176,28 | 38,16  | 32,15  | 125,00 | 53,01  | 257,80   | 682,40   |



|           |                  |        |        |        |        |        |          |          |
|-----------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| Noviembre | 01/11/2020 17:00 | 176,28 | 0,00   | 32,15  | 100,00 | 53,01  | 309,36   | 670,80   |
| Noviembre | 01/11/2020 18:00 | 205,66 | 0,00   | 37,51  | 95,00  | 61,85  | 412,48   | 812,50   |
| Noviembre | 01/11/2020 19:00 | 235,04 | 0,00   | 42,87  | 87,50  | 70,68  | 515,60   | 951,69   |
| Noviembre | 01/11/2020 20:00 | 264,42 | 0,00   | 48,23  | 80,00  | 79,52  | 206,24   | 678,40   |
| Noviembre | 01/11/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre | 01/11/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Noviembre | 01/11/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 0:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 1:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 2:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 3:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 4:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 5:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 6:00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 7:00  | 734,50 | 127,20 | 107,18 | 250,00 | 176,70 | 1.031,20 | 2.426,78 |
| Diciembre | 01/12/2020 8:00  | 661,05 | 114,48 | 96,46  | 200,00 | 159,03 | 721,84   | 1.952,86 |
| Diciembre | 01/12/2020 9:00  | 587,60 | 101,76 | 85,74  | 150,00 | 141,36 | 670,28   | 1.736,74 |
| Diciembre | 01/12/2020 10:00 | 514,15 | 89,04  | 75,02  | 125,00 | 123,69 | 618,72   | 1.545,62 |
| Diciembre | 01/12/2020 11:00 | 440,70 | 76,32  | 64,31  | 100,00 | 106,02 | 567,16   | 1.354,51 |
| Diciembre | 01/12/2020 12:00 | 367,25 | 63,60  | 53,59  | 75,00  | 88,35  | 515,60   | 1.163,39 |
| Diciembre | 01/12/2020 13:00 | 330,53 | 57,24  | 48,23  | 50,00  | 79,52  | 412,48   | 977,99   |
| Diciembre | 01/12/2020 14:00 | 293,80 | 50,88  | 42,87  | 45,00  | 70,68  | 309,36   | 812,59   |
| Diciembre | 01/12/2020 15:00 | 257,08 | 44,52  | 37,51  | 37,50  | 61,85  | 288,74   | 727,19   |
| Diciembre | 01/12/2020 16:00 | 220,35 | 38,16  | 32,15  | 125,00 | 53,01  | 257,80   | 726,47   |
| Diciembre | 01/12/2020 17:00 | 220,35 | 0,00   | 32,15  | 100,00 | 53,01  | 309,36   | 714,87   |
| Diciembre | 01/12/2020 18:00 | 257,08 | 0,00   | 37,51  | 95,00  | 61,85  | 412,48   | 863,91   |
| Diciembre | 01/12/2020 19:00 | 293,80 | 0,00   | 42,87  | 87,50  | 70,68  | 515,60   | 1.010,45 |
| Diciembre | 01/12/2020 20:00 | 330,53 | 0,00   | 48,23  | 80,00  | 79,52  | 206,24   | 744,51   |
| Diciembre | 01/12/2020 21:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 22:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |
| Diciembre | 01/12/2020 23:00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 206,24   | 206,24   |

Tabla nº163. Demanda horaria de los clientes de la red de calor de Villablino durante todo el año

De este estudio se extrae que la demanda horaria mínima en el sistema se da en verano, en concreto en los meses de julio y agosto, y tiene un valor de 61,87 kWh. Esta demanda corresponde a las noches de verano donde se tienen que climatizar ciertas zonas del Centro de Salud Valle Lacia.



### **7.2.7.3. *Discusión de los resultados obtenidos***

Para evaluar la validez de los resultados obtenidos se han buscado casos reales de redes de calor y se han comparado los resultados de la demanda térmica de los sistemas. La curva de demanda horaria en un día de invierno, representada en la figura nº78, es muy similar a la mostrada en los estudios de (Chramcov 2010) y (Gadd, H. & Werner 2013).

Por otro lado, se plantea la cuestión de si es necesario tener una cobertura de la demanda completa o de si se puede optimizar el sistema, apoyándose en la instalación existente, para cubrir la demanda de los clientes de una manera razonable sin disparar los costes de la instalación (cuanto mayor potencia instalada, mayor es el coste).

#### **Límite superior de cobertura de la demanda**

Los resultados de estudio de demanda indican que la potencia requerida en el sistema de generación de la red de calor es de al menos 2.426,78 kWh para cubrir la demanda del 100% de las horas de funcionamiento. Sin embargo, este valor de demanda se da en muy pocas ocasiones a lo largo del año ya que se da únicamente en los meses de invierno entre las 07:00 y las 08:00.

Se considera que, si la red de calor es capaz de realizar una cobertura de la demanda del 98%, entonces el objetivo de diseño de la misma queda cumplido, debido a que los sistemas existentes de calefacción no se sustituirán, sino que servirán de apoyo en cada uno de los edificios para cubrir las puntas de demanda que la geotermia no pueda cubrir.

Para llegar a obtener esta potencia es necesario conocer las horas de funcionamiento del sistema. Estas horas de funcionamiento las marca el centro de salud Valle Laciana puesto que tiene que estar en funcionamiento durante las 24 horas del día, en todos los días del año, por lo que las horas totales de funcionamiento son 8.760 horas.

Fijando el suministro energético del sistema en 1.900 kWh se puede observar que la red de calor no cubriría la demanda entre las 06:45 y las 08:15, es decir durante un periodo de una hora y media. Este hecho se puede observar gráficamente en la figura nº79.

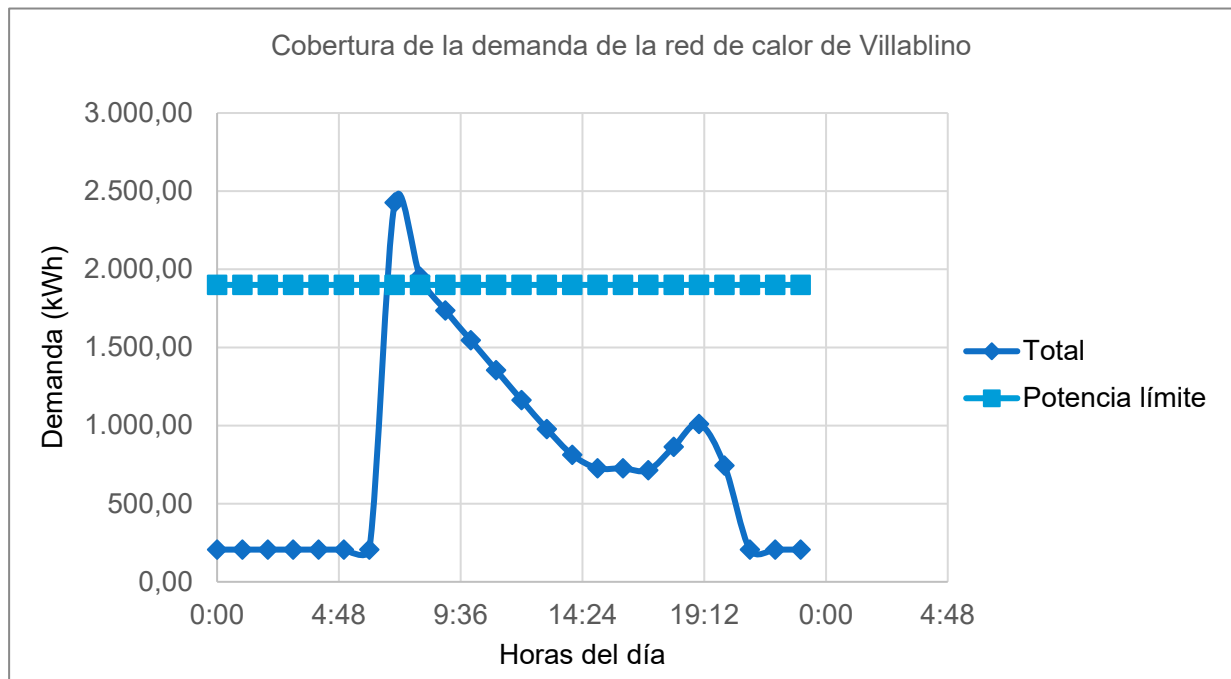


Figura nº79. Cobertura de la demanda con un suministro energético límite de 1.900 kWh.

Esta distribución de potencia se da únicamente en los meses enero, febrero, y diciembre ya que su demanda horaria máxima es de 2.426,78 kWh. Los días en los que no se satisface la demanda en cada mes son los correspondientes a los laborables, ya que durante los fines de semana la única demanda existente es la del centro de salud Valle Laciana registrando una demanda muy inferior.

La estimación de la demanda horaria a lo largo del año permite saber cuántas horas se encuentran por encima de 1.900 kWh, existiendo un total de 168 horas.

Si comparamos este número de horas con las horas de funcionamiento totales, representan un 1,92%, inferior al 2% fijado por diseño.

En consecuencia, la fijación del suministro energético máximo en 1.900 kWh realiza una cobertura de la demanda razonable y supone un ahorro económico considerable frente a la situación de instalar los equipos para cubrir el 100% de la demanda.

### Límite inferior de la cobertura de la demanda

Los equipos tienen problemas operativos a baja carga, es decir, cuando la demanda del sistema no es lo suficientemente cuantiosa como para mantener a los equipos dentro de unos parámetros de funcionamiento normales.



Existen unos caudales mínimos de funcionamiento tanto en el condensador como en el evaporador que de no cumplirse pondrían en peligro la durabilidad de los equipos. Por lo tanto, cuando la demanda sea tan baja que no produzca la circulación de caudal mínima en las enfriadoras, el sistema deberá parar.

Esto implica que, a baja demanda del sistema, la red de calor no se pondrá en funcionamiento y tendrán que entrar en funcionamiento los sistemas de calefacción auxiliares existentes actualmente en las salas técnicas (calderas de carbón, calderas de fuel o calderas de biomasa) (Fernández 2018; García-Carro, F.M. & Solís 2019).

Limitando esta demanda mínima a 500 kWh se obtiene, a partir del estudio de demanda horaria del sistema, que hay un total de 5.940 horas cuya demanda es inferior al límite mínimo. Esto implica que durante todas esas horas la red de calor no entrará en funcionamiento y la demanda deberá ser cubierta por los sistemas auxiliares. Esto corresponde a un 67,81 % de las horas totales en las que existe demanda (8.760 horas). El límite se considera razonable ya que la mayoría de las instalaciones de calefacción se encuentran paradas durante los meses cálidos y por la noche de los meses fríos suponiendo un porcentaje aproximado de parada del 75% a lo largo año.

Teniendo en cuenta los límites tanto superior como inferior de las enfriadoras se tiene que la red funcionaría un total de 2.652 horas al año, correspondiendo con un 30,27% con respecto a las horas totales del año.

Las horas de funcionamiento del sistema se recogen en la tabla nº164:

| <b>Límites de funcionamiento enfriadoras</b> |        |
|--|--------|
| Horas año                                    | 8.760  |
| Potencia máx (kW)                            | 1.900  |
| Potencia mín (kW)                            | 500    |
| Horas > Pot máx                              | 168    |
| % tiempo no cubierto por Pot máx             | 1,92%  |
| Horas < Pot mín                              | 5.940  |
| % tiempo no cubierto por Pot mín             | 67,81% |
| Horas de funcionamiento                      | 2.652  |
| %funcionamiento                              | 30,27% |

Tabla nº164. Horas de funcionamiento de la red de calor de Villablino.





## 7.3. RECURSO GEOTÉRMICO DEL AGUA DE LA BOCAMINA DE CALDERÓN

### 7.3.1. Parametrización

El potencial térmico que se puede extraer de un fluido viene dado por la siguiente fórmula (Jardón 2010):

$$P_W = Q \cdot \Delta T \cdot C_S \cdot \rho$$

Donde:

$P_W$  : Potencia térmica del fluido [W]

$Q$  : Caudal o flujo del fluido [l/s]

$\Delta T$  : Incremento de temperatura que experimenta el fluido [°C]

$C_S$  : Calor específico del fluido [J/kg·°C]

$\rho$  : Densidad del fluido [kg/l]

Por lo tanto, los parámetros necesarios para conocer el potencial geotérmico del agua de la bocamina del grupo Calderón son la temperatura y el caudal.

- Cuanta mayor temperatura haya, menor tendrá que ser el salto térmico necesario en las enfriadoras y por lo tanto mejor rendimiento tendrá el sistema.
- Cuanto mayor caudal de agua se pueda extraer de la bocamina, sin afectar a su estructura, mayor potencia térmica tendrá el recurso.

Se va a considerar que el caudal de agua disponible en la bocamina es el que sale naturalmente a través de esta en los canales de drenaje ejecutados a la salida de la misma.

La temperatura del recurso se obtuvo en la caracterización del agua de las minas abandonadas del Valle Laciana (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a). En ese estudio se concluyó que la temperatura media del agua de la bocamina de Calderón a lo largo del año del agua era de 14,4°C.

### 7.3.2. Medición in situ del caudal

Se ha llevado a cabo una campaña de medición in situ del caudal que emana naturalmente de la bocamina de Calderón. Esta campaña se ha ejecutado durante todo un año natural para ver las variaciones estacionales del caudal, realizando un total de 4 jornadas de ensayos



cubriendo todas las estaciones climatológicas (verano de 2019, otoño de 2019, invierno de 2020 y primavera de 2020).

### 7.3.2.1. *Materiales y métodos*

No ha sido posible disponer de medidores de caudal ni aforadores para llevar a cabo las mediciones, por lo tanto, no se han podido realizar mediciones directas del caudal. Este inconveniente se ha solucionado ejecutando mediciones indirectas atendiendo a la propia definición de caudal:

“El caudal es la cantidad de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo” (RAE 2020).

Esto se traduce como magnitud física a la siguiente expresión:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Siendo:

$Q$ : Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$V$ : Volumen [ $\text{m}^3$ ]

$t$ : Tiempo [s]

O lo que es lo mismo:

$$Q = v \cdot S$$

Donde:

$Q$ : Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$v$ : Velocidad [m/s]

$S$ : Sección [ $\text{m}^2$ ]

Considerando la velocidad de un objeto igual a la longitud que recorre entre el tiempo que tarda en recorrerlo nos queda la expresión utilizada por (Wolkersdorfer 2008) para medir el caudal que sale de una bocamina, es decir:

$$Q = \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot S \cdot f$$



Este autor introduce el factor  $f$  (valor adimensional entre 0,66 y 0,9) que tiene en cuenta el hecho de que la velocidad del fluido no es igual en toda su sección, sino que es menor cerca de las paredes del canal que en el centro del mismo (Wolkersdorfer 2008).

El factor  $f$  se puede calcular de la siguiente manera en función de  $d$  (profundidad del reguero, en este caso, del canal):

$$f = \begin{cases} 0.3 \leq d \leq 1.8: & f = 0.64 + \frac{0.2 \times d}{3} \\ d \geq 1.8: & f = (1.4 - 0.06 \times \sqrt{d})^{-1} \end{cases}$$

Al considerarse  $d=0,3$  metros en los canales observados, el factor  $f$  es igual a 0,66.

Para poder registrar esta velocidad se diseñó un ensayo consistente en lo siguiente:

1. En primer lugar, se delimitaron unos puntos a los lados de los canales que señalaran dos metros lineales de canal. En la figura nº80 se puede ver la delimitación de marcas de longitud en los canales a evaluar.





Figura nº80. Delimitación de longitud en canales de la bocamina de Calderón.

2. Se confeccionaron los elementos flotantes que navegarían por el canal.
3. Se midió el tiempo que tardaba la corriente en transportar dos metros los elementos flotantes. Se hicieron dos mediciones, la primera reflejaba el tiempo que tardaba el flotador en ir desde la señal "0" a la señal "1" y la segunda reflejaba el tiempo que tardaba el flotador en ir desde la señal "1" a la señal "2".
4. Se repitió el ensayo hasta tener medidas homogéneas del tiempo que tardaban los flotadores en recorrer un metro de distancia (4 repeticiones).
5. Se calculó la velocidad aceptando como razonable la aproximación de considerar la velocidad del flujo igual a la velocidad de los flotadores. Ésta fue calculada a partir del espacio recorrido por los flotadores (1 metro) partido del tiempo que habían tardado en recorrer esa distancia (tiempo medido en los ensayos).

Teniendo la velocidad del fluido y midiendo in situ la sección del canal, la cual se consideró constante en los dos metros lineales donde se efectuaba el ensayo, fue posible determinar el caudal que emana naturalmente de la bocamina de Calderón.

Las mediciones se ejecutaron en los dos puntos geográficos señalados por un círculo en la figura nº81:



Figura n°81. Localización de los puntos de muestreo de la campaña de medición de caudales (encuadre horizontal: 260m).

El punto situado a la derecha en la imagen anterior es la entrada a la mina de montaña de Calderón, la cual tiene un canal en su parte izquierda por donde fluye el agua de mina naturalmente. Por otro lado, el punto situado a la izquierda se trata de una canalización de agua que se encuentra al lado de los transformadores del pozo Calderón que es donde va a dar parte del agua que sale de la bocamina.

En las figuras n°82 y n°83 se pueden ver los dos canales donde se realizaron las mediciones de caudal de agua que salía de la mina de montaña de Calderón.



Figura nº82. Bocamina de Calderón con el canal de salida de agua de mina a la izquierda.



Figura nº83. Canal en la zona de los transformadores de Calderón.



### 7.3.2.2. Resultados y discusión

En este apartado se recogen las mediciones parciales y resultados finales de la campaña de medición del caudal. Como resultado del estudio se obtiene un caudal medio que será utilizado como dato de partida en el diseño del sistema de generación de la red de calor de Villablino.

En la tabla nº165 se pueden ver las mediciones tomadas in situ y los cálculos efectuados hasta la obtención del caudal que salía de la bocamina de Calderón el día 15 de agosto de 2019.

| Estudio de caudales (Verano 2019)    |                          |      |       |                                      |                   |      |      |
|--------------------------------------|--------------------------|------|-------|--------------------------------------|-------------------|------|------|
| Día                                  | 15/08/2019               |      |       |                                      |                   |      |      |
| Localización                         | Calderón transformadores |      |       | Localización                         | Calderón bocamina |      |      |
| <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,09                     |      |       | <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,08              |      |      |
| Anchura (m)                          | 0,45                     |      |       | Anchura (m)                          | 0,68              |      |      |
| Calado (m)                           | 0,20                     |      |       | Calado (m)                           | 0,12              |      |      |
| <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00                     | 1,00 | 2,00  | <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00              | 1,00 | 2,00 |
| Tiempo 1 (s)                         | 0,00                     | 6,50 | 11,20 | Tiempo 1 (s)                         | 0,00              | 3,06 | 5,62 |
| Tiempo 2 (s)                         | 0,00                     | 4,21 | 7,93  | Tiempo 2 (s)                         | 0,00              | 3,90 | 6,77 |
| Tiempo 3 (s)                         | 0,00                     | 4,29 | 8,30  | Tiempo 3 (s)                         | 0,00              | 3,75 | 6,98 |
| Tiempo 4 (s)                         | 0,00                     | 4,94 | 8,41  | Tiempo 4 (s)                         | 0,00              | 3,87 | 7,11 |
| Velocidad 1 (m/s)                    | 0,15                     | 0,21 | 0,18  | Velocidad 1 (m/s)                    | 0,33              | 0,39 | 0,36 |
| Velocidad 2 (m/s)                    | 0,24                     | 0,27 | 0,25  | Velocidad 2 (m/s)                    | 0,26              | 0,35 | 0,30 |
| Velocidad 3 (m/s)                    | 0,23                     | 0,25 | 0,24  | Velocidad 3 (m/s)                    | 0,27              | 0,31 | 0,29 |
| Velocidad 4 (m/s)                    | 0,20                     | 0,29 | 0,24  | Velocidad 4 (m/s)                    | 0,26              | 0,31 | 0,28 |
| <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,23                     |      |       | <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,31              |      |      |
| <b>Desviación típica</b>             | 0,04                     |      |       | <b>Desviación típica</b>             | 0,04              |      |      |
| <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66                     |      |       | <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66              |      |      |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 49,10                    |      |       | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 59,53             |      |      |
| <b>Caudal (l/s)</b>                  | 13,64                    |      |       | <b>Caudal (l/s)</b>                  | 16,54             |      |      |

Tabla nº165. Tabla de datos y cálculos de la campaña de medición de caudales (verano 2019)

Como se puede observar en la tabla nº165 el caudal medido en el punto “Calderón transformadores” es ligeramente inferior al medido al medido directamente en la bocamina de Calderón. De estos datos se puede extraer que no todo el caudal que sale de la mina de montaña de Calderón llega hasta el punto de muestreo “Calderón transformadores”.

En consecuencia, se considera más fiable la medición tomada directamente en la bocamina de Calderón, obteniendo un caudal aproximado de 16,54 l/s. La desviación típica de todas las



mediciones de velocidad tomadas no supera 0,04 m/s, por lo tanto, se considera que las mediciones han sido buenas.

En la tabla nº166 se pueden ver las mediciones tomadas in situ y los cálculos efectuados hasta la obtención del caudal que salía de la bocamina de Calderón el día 11 de noviembre de 2019.

| Estudio de caudales (Otoño 2019)     |                          |       |       |                                      |                   |      |      |
|--------------------------------------|--------------------------|-------|-------|--------------------------------------|-------------------|------|------|
| Día                                  | 01/11/2019               |       |       |                                      |                   |      |      |
| Localización                         | Calderón transformadores |       |       | Localización                         | Calderón bocamina |      |      |
| <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,16                     |       |       | <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,11              |      |      |
| Anchura (m)                          | 0,64                     |       |       | Anchura (m)                          | 0,68              |      |      |
| Calado (m)                           | 0,25                     |       |       | Calado (m)                           | 0,16              |      |      |
| <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00                     | 1,00  | 2,00  | <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00              | 1,00 | 2,00 |
| Tiempo 1 (s)                         | 0,00                     | 13,80 | 24,90 | Tiempo 1 (s)                         | 0,00              | 3,89 | 8,25 |
| Tiempo 2 (s)                         | 0,00                     | 11,20 | 22,03 | Tiempo 2 (s)                         | 0,00              | 4,62 | 8,56 |
| Tiempo 3 (s)                         | 0,00                     | 14,04 | 23,90 | Tiempo 3 (s)                         | 0,00              | 4,51 | 8,22 |
| Tiempo 4 (s)                         | 0,00                     | 14,47 | 27,41 | Tiempo 4 (s)                         | 0,00              | 4,39 | 8,44 |
| Velocidad 1 (m/s)                    | 0,07                     | 0,09  | 0,08  | Velocidad 1 (m/s)                    | 0,26              | 0,23 | 0,24 |
| Velocidad 2 (m/s)                    | 0,09                     | 0,09  | 0,09  | Velocidad 2 (m/s)                    | 0,22              | 0,25 | 0,23 |
| Velocidad 3 (m/s)                    | 0,07                     | 0,10  | 0,08  | Velocidad 3 (m/s)                    | 0,22              | 0,27 | 0,24 |
| Velocidad 4 (m/s)                    | 0,07                     | 0,08  | 0,07  | Velocidad 4 (m/s)                    | 0,23              | 0,25 | 0,24 |
| <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,08                     |       |       | <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,24              |      |      |
| <b>Desviación típica</b>             | 0,01                     |       |       | <b>Desviación típica</b>             | 0,02              |      |      |
| <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66                     |       |       | <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66              |      |      |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 31,39                    |       |       | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 62,02             |      |      |
| <b>Caudal (l/s)</b>                  | 8,72                     |       |       | <b>Caudal (l/s)</b>                  | 17,23             |      |      |

Tabla nº166. Tabla de datos y cálculos de la campaña de medición de caudales (otoño 2.019)

En Otoño de 2019 se mantiene la observación hecha en verano al respecto del mayor caudal medido directamente en la bocamina de Calderón, en comparación con el caudal medido en los transformadores del pozo.

El caudal medido en la bocamina es 17,23 l/s muy similar al medido en verano (16,54 l/s), por lo tanto, se mantiene una cierta estabilidad en el caudal natural que sale de las minas.

Este dato debe entenderse en su contexto temporal, ya que tanto las estaciones de verano como la de otoño se consideran estaciones secas pudiendo reflejar este caudal el mínimo anual en la bocamina.





La desviación típica de todas las mediciones de velocidad tomadas no supera 0,02 m/s, por lo tanto, se considera que las mediciones han sido buenas.

En la tabla n°167 se pueden ver las mediciones tomadas in situ y los cálculos efectuados hasta la obtención del caudal que salía de la bocamina de Calderón el día 27 de diciembre de 2019.

| Estudio de caudales (Invierno 2020)  |                          |      |      |                                      |                   |  |
|--------------------------------------|--------------------------|------|------|--------------------------------------|-------------------|--|
| Día                                  | 27/12/2019               |      |      |                                      |                   |  |
| Localización                         | Calderón transformadores |      |      | Localización                         | Calderón bocamina |  |
| <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,42                     |      |      | <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | Inundado          |  |
| Anchura (m)                          | 0,90                     |      |      | Anchura (m)                          |                   |  |
| Calado (m)                           | 0,47                     |      |      | Calado (m)                           |                   |  |
| <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00                     | 1,00 | 2,00 | <b>Distancia (m)</b>                 |                   |  |
| Tiempo 1 (s)                         | 0,00                     | 2,63 | 4,77 | Tiempo 1 (s)                         |                   |  |
| Tiempo 4 (s)                         | 0,00                     | 3,04 | 5,06 | Tiempo 2 (s)                         |                   |  |
| Tiempo 5 (s)                         | 0,00                     | 2,42 | 4,46 | Tiempo 3 (s)                         |                   |  |
| Tiempo 7 (s)                         | 0,00                     | 2,98 | 5,21 | Tiempo 4 (s)                         |                   |  |
| Velocidad 1 (m/s)                    | 0,38                     | 0,47 | 0,42 | Velocidad 1 (m/s)                    |                   |  |
| Velocidad 4 (m/s)                    | 0,33                     | 0,50 | 0,40 | Velocidad 2 (m/s)                    |                   |  |
| Velocidad 5 (m/s)                    | 0,41                     | 0,49 | 0,45 | Velocidad 3 (m/s)                    |                   |  |
| Velocidad 7 (m/s)                    | 0,34                     | 0,45 | 0,38 | Velocidad 4 (m/s)                    |                   |  |
| <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,42                     |      |      | <b>Velocidad media (m/s)</b>         | -                 |  |
| <b>Desviación típica</b>             | 0,06                     |      |      | <b>Desviación típica</b>             | -                 |  |
| <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66                     |      |      | <b>Factor velocidad (f)</b>          | -                 |  |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 419,25                   |      |      | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | -                 |  |
| <b>Caudal (l/s)</b>                  | 116,46                   |      |      | <b>Caudal (l/s)</b>                  | -                 |  |

Tabla n°167. Tabla de datos y cálculos de la campaña de medición de caudales (invierno 2020)

En esta ocasión la homogeneidad en las mediciones con respecto a los dos muestreos anteriores se pierde completamente debido a la llegada de las precipitaciones en los meses de noviembre y diciembre de 2019.

No fue posible realizar mediciones en la bocamina debido a que el canal se desbordó inundando la zona y no permitiendo realizar el ensayo. No obstante, se pudo acceder a la zona de los transformadores de Calderón permitiendo realizar las mediciones correspondientes en este punto de muestreo. La medición de caudal en este punto es cerca de 9 veces mayor a la registrada en las anteriores ocasiones mostrando una variación estacional muy importante, algo, por otra parte, esperable.



La desviación típica de todas las mediciones de velocidad tomadas no supera 0,06 m/s. Esta desviación típica es algo superior a la calculada en otras estaciones del año y es debido al gran caudal que salía de las minas y las peores condiciones que se tenían a la hora de tomar los datos.

En la figura nº84 se puede comparar el canal del punto de muestreo en las ocasiones anteriores y en invierno de 2020:



Figura nº84. Comparación entre el calado del canal de los transformadores de Calderón en verano de 2019 e invierno de 2020.

En primavera de 2020 se pudieron volver a realizar medidas normales debido a que las inundaciones vistas en invierno habían cesado.

Se registra un mayor caudal directamente en la bocamina de Calderón que en la zona de los transformadores, como ya se observó en verano y otoño de 2019.

El caudal registrado en ambos puntos es considerablemente mayor que los registrados en verano y otoño del año anterior llegando a ser aproximadamente del doble. Esta variación se debe a las fluctuaciones del nivel freático debido a la pluviometría local. En las estaciones de invierno y primavera se registra un mayor número de precipitaciones mientras que el verano y el otoño se consideran estaciones secas.

En la tabla nº168 se pueden ver las mediciones tomadas in situ y los cálculos efectuados hasta la obtención del caudal que salía de la bocamina de Calderón el día 5 de mayo de 2020.



| Estudio de caudales (Primavera 2020) |                          |      |      |                                      |                   |      |      |
|--------------------------------------|--------------------------|------|------|--------------------------------------|-------------------|------|------|
| Día                                  | 05/05/2020               |      |      |                                      |                   |      |      |
| Localización                         | Calderón transformadores |      |      | Localización                         | Calderón bocamina |      |      |
| <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,12                     |      |      | <b>Sección canal (m<sup>2</sup>)</b> | 0,16              |      |      |
| Anchura (m)                          | 0,55                     |      |      | Anchura (m)                          | 0,68              |      |      |
| Calado (m)                           | 0,22                     |      |      | Calado (m)                           | 0,24              |      |      |
| <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00                     | 1,00 | 2,00 | <b>Distancia (m)</b>                 | 0,00              | 1,00 | 2,00 |
| Tiempo 1 (s)                         | 0,00                     | 3,02 | 5,86 | Tiempo 1 (s)                         | 0,00              | 3,40 | 6,91 |
| Tiempo 2 (s)                         | 0,00                     | 3,05 | 5,95 | Tiempo 2 (s)                         | 0,00              | 3,06 | 6,31 |
| Tiempo 3 (s)                         | 0,00                     | 2,93 | 5,64 | Tiempo 3 (s)                         | 0,00              | 3,09 | 6,33 |
| Tiempo 4 (s)                         | 0,00                     | 3,02 | 5,88 | Tiempo 4 (s)                         | 0,00              | 3,25 | 6,69 |
| Velocidad 1 (m/s)                    | 0,33                     | 0,35 | 0,34 | Velocidad 1 (m/s)                    | 0,29              | 0,28 | 0,29 |
| Velocidad 2 (m/s)                    | 0,33                     | 0,34 | 0,34 | Velocidad 2 (m/s)                    | 0,33              | 0,31 | 0,32 |
| Velocidad 3 (m/s)                    | 0,34                     | 0,37 | 0,35 | Velocidad 3 (m/s)                    | 0,32              | 0,31 | 0,32 |
| Velocidad 4 (m/s)                    | 0,33                     | 0,35 | 0,34 | Velocidad 4 (m/s)                    | 0,31              | 0,29 | 0,30 |
| <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,34                     |      |      | <b>Velocidad media (m/s)</b>         | 0,31              |      |      |
| <b>Desviación típica</b>             | 0,01                     |      |      | <b>Desviación típica</b>             | 0,01              |      |      |
| <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66                     |      |      | <b>Factor velocidad (f)</b>          | 0,66              |      |      |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 98,69                    |      |      | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>      | 118,44            |      |      |
| <b>Caudal (l/s)</b>                  | 27,41                    |      |      | <b>Caudal (l/s)</b>                  | 32,90             |      |      |

Tabla nº168. Tabla de datos y cálculos de la campaña de medición de caudales (primavera 2020)

La desviación típica de todas las mediciones de velocidad tomadas no supera 0,01 m/s, por lo tanto, se considera que las mediciones han sido buenas.

Se ha calculado el caudal medio que sale naturalmente de la bocamina de Calderón, teniendo en cuenta que en invierno de 2020 no se pudo realizar la medida directamente por encontrarse la bocamina inundada. Debido a esto se estima que el caudal en la bocamina de Calderón era igual al medido en la zona de transformadores, a pesar de que en el resto de los registros se ha demostrado que es mayor.

En la tabla nº169 se recogen los valores de caudal medidos a lo largo del año en las dos localizaciones estudiadas. Además, se presenta el caudal medio en ambas localizaciones y el caudal de diseño que se utilizará en los cálculos posteriores.



| Caudal medio a lo largo del año (l/s) |                          |                      |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Localización                          | Calderón transformadores | Bocamina de Calderón |
| Verano 2019                           | 13,64                    | 16,54                |
| Otoño 2019                            | 8,72                     | 17,23                |
| Invierno 2020                         | 116,46                   | 176,45               |
| Primavera 2020                        | 27,41                    | 32,90                |
| Caudal medio                          | 41,56                    | 60,78                |
| Caudal medio considerado              | 51,17                    |                      |

Tabla nº169. Caudal medio disponible a lo largo del año (l/s) en la bocamina de Calderón.

Se considera un caudal medio de cálculo de 51,17 l/s, correspondiente a la media aritmética de los dos puntos estudiados. Esto es así para considerar las posibles pérdidas que pudiera haber entre la bocamina y la zona de captación del sistema. Por lo tanto, el caudal medio a lo largo del año es:

$$Q_M = 51,17 \text{ l/s}$$

Teniendo en cuenta el caudal medio, la densidad del agua ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ ), el calor específico de la misma ( $4,184 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ) y un salto térmico de  $5^\circ\text{C}$ , se puede hallar el potencial térmico del agua de la mina de montaña de Calderón:

$$P_W = 1.070,48 \text{ kW}$$



## 7.4. SISTEMA DE GENERACIÓN

El sistema de generación de la red de calor de Villablino que se propone en este trabajo está integrado por los siguientes componentes principales:

1. Depósito térmico: su función principal es acumular agua de mina para poder dotar de regulación al sistema. Recoge el agua de mina que sale naturalmente por la bocamina de Calderón y la almacena en un espacio manteniendo su temperatura.
2. Intercambiador de calor de agua de mina: su función principal es proteger los evaporadores de las enfriadoras, independizando los circuitos y transmitiendo el calor procedente del agua de mina al circuito de los evaporadores, el cual transporta en su interior agua de red, menos agresiva que el agua de mina.
3. Enfriadoras: se encargan de aumentar la temperatura del agua desde los 14°C que tiene el agua de mina, hasta los 75°C necesarios para poder cumplir la demanda térmica de los clientes. Estos equipos funcionan como intercambiadores de calor entre dos circuitos, el de evaporadores y el de condensadores.

El diseño de estos elementos se ha hecho de aguas abajo hacia aguas arriba, es decir, desde los clientes (partiendo del estudio de demanda desarrollado anteriormente), hasta el depósito térmico que acumula agua de mina. De esta forma, se han dimensionado en primer lugar las enfriadoras, posteriormente el intercambiador de calor de agua de mina y por último se dimensionará el depósito térmico.

### 7.4.1. Enfriadoras

#### 7.4.1.1. Introducción

Las bombas de calor son equipos que toman calor de un medio, ya sea tierra, agua o aire, y la transfieren a otro. Esto es posible a través de un ciclo termodinámico de Carnot en el que se toma el calor del medio, se le transfiere a un fluido conductor (refrigerante) el cual lo transmite nuevamente al medio que se quiere calentar (Perko, J., Dugec, V., Topic, D., Sljivac, D. & Kovac 2011).

En este estudio no se van a utilizar bombas de calor sino enfriadoras, las cuales tienen el mismo método de funcionamiento que las bombas de calor, pero pueden impulsar el calor únicamente en un sentido, mientras que las bombas pueden revertir el ciclo e impulsar calor



en ambos sentidos dependiendo de las condiciones de los medios exteriores (Carrier Air Conditioning Company 1965).

El equipo está formado fundamentalmente por un condensador, un evaporador, un compresor y una válvula de expansión dispuestos de la manera esquemática que se muestra en la figura nº85:

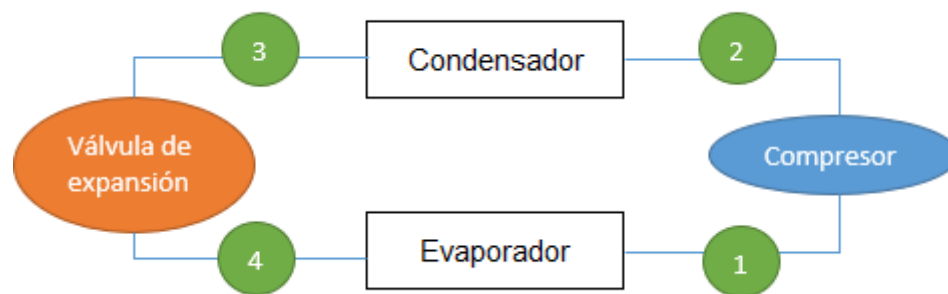


Figura nº85. Esquema de componentes de una enfriadora.

Para mejorar el rendimiento del sistema se puede realizar un subenfriamiento mediante un subenfriador o una válvula reductora de presión o un sobrecalentamiento a la salida del evaporador, siendo lo más habitual utilizar ambas opciones (Pitarch, M., Navarro-Peris, E., González-Maciá, J. & Corberán 2017; Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera 2014; Kondou, C. & Koyama 2014; Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R., Arauzo, I. & Catalán-Gil 2016).

El ciclo termodinámico que experimenta el refrigerante se puede observar en la gráfica Presión-Entalpía de la figura nº86 (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, Nobuo. & Koyama 2014; Jankovic, Z. Sieres-Atienza, J. & Martínez-Suárez 2015; Kondou, C. & Koyama 2014; Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera 2014):

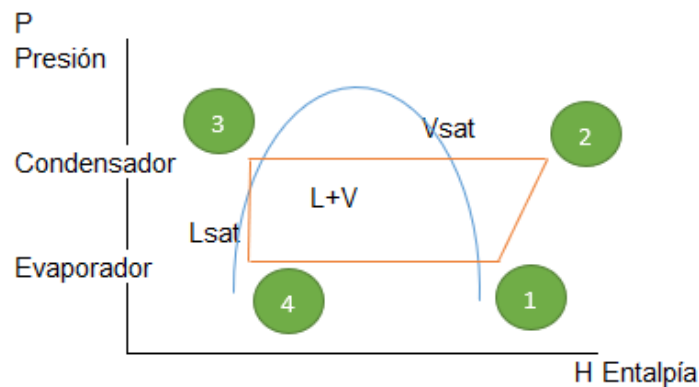


Figura nº86. Diagrama de fases típico de un ciclo Carnot (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014).

Los números 1, 2, 3 y 4 vistos en las dos figuras anteriores se utilizan para hacer corresponder el punto del ciclo de Carnot con la zona física del circuito de la enfriadora donde se produce.

- Evaporador (4-1): Se produce un aumento de la entalpía debido a la transmisión de calor entre el fluido y el refrigerante. Se baja la temperatura del fluido.
- Compresor (1-2): El compresor utiliza energía eléctrica para aumentar la presión del refrigerante, a la vez que aumenta su entalpía y su temperatura. En caso de que esta acción fuera ideal se mantendría la entropía entre los puntos 1 y 2, pero debido a que el rendimiento del compresor no es 1, la entropía en el punto 2 es mayor que la entropía en el punto 1 (Suárez 2014).
- Condensador (2-3): Se produce una disminución de la entalpía del refrigerante debido al intercambio de calor entre el refrigerante y el fluido captador. Se aumenta la temperatura del fluido.
- Válvula de expansión (3-4): La válvula de expansión reduce la presión del refrigerante introduciéndolo de nuevo en la zona Líquido+Vapor del diagrama de fases.

La metodología seguida para el diseño de las enfriadoras es la siguiente:

1. Definición de los límites de funcionamiento de los equipos según su potencia, a partir del estudio de demanda.
2. Cálculo del ciclo Carnot del refrigerante utilizado dentro de las enfriadoras (R1234-ZE).
3. Cálculo de los parámetros termodinámicos de las enfriadoras, así como el calor cedido por el condensador, el calor absorbido por el evaporador, el trabajo del compresor y el COP de las mismas.



#### 7.4.1.2. *Diseño de las enfriadoras*

##### Ciclo termodinámico del refrigerante

El refrigerante elegido para ser utilizado como medio conductor de las enfriadoras de la red de calor de Villablino es el R1234-ZE. El cambio climático y los efectos negativos de los refrigerantes que se venían utilizando recientemente en los ciclos frigoríficos ha hecho que se busquen refrigerantes menos agresivos con el medio ambiente.

Uno de los refrigerantes más utilizados en equipos frigoríficos hasta el momento era el R134a con un índice GWP=1430 (Global Warming Potentials). Su sustituto, el R1234-ZE tiene un GWP=6, lo cual significa que tiene un potencial de contribución al calentamiento global mucho más bajo (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014).

Para obtener las propiedades termodinámicas del ciclo de Carnot en las enfriadoras de estudio, se parte de recomendaciones encontradas en bibliografía especializada, al respecto de la temperatura del condensador, el sobrecalentamiento del evaporador, el subenfriamiento del condensador y la variación de temperatura del refrigerante entre el condensador y el evaporador:

- Según el estudio de (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014) el COP (Coefficient of Performance) de las enfriadoras se maximiza cuando la temperatura del refrigerante en el condensador es 20°C inferior a la temperatura crítica del mismo. Teniendo en cuenta las conclusiones de (Higashi, Y., Hayasaka, S., & Ogiya 2013), la temperatura crítica del refrigerante R1234-RE es de 109,4°C, por lo tanto, la temperatura máxima del condensador (punto 2) se va a fijar en 89,4°C.
- Tomando como ejemplo los modelos de (Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera 2014) y (Kondou, C. & Koyama 2014) se fija una temperatura de subenfriamiento de 2°C y una temperatura de sobrecalentamiento de 5°C.
- Por último, se fija el salto de temperatura del refrigerante entre el condensador y el evaporador en 35°C, según la modelización de (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014).

Estos datos de partida y restricciones se resumen en la tabla nº170:





| Parámetro  | Valor | Unidad | Referencia   |
|--|-------|--------|--|
| Temperatura crítica del refrigerante                               | 109,4 | °C     | (Higashi, Y., Hayasaka, S., & Ogiya 2013)  |
| Temperatura del condensador (20°C menos que la temperatura límite) | 89,4  | °C     | (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014).  |
| Elevación de temperatura   | 35,0  | °C     | (Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama 2014).  |
| Subenfriamiento  | 2,0   | °C     | (Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera 2014; Kondou, C. & Koyama 2014) |
| Sobrecalentamiento   | 5,0   | °C     | (Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera 2014; Kondou, C. & Koyama 2014) |

Tabla nº170. Datos de partida para confeccionar el ciclo Carnot en las enfriadoras de estudio.

Estos datos de partida son básicos para poder fijar las condiciones termodinámicas del ciclo de Carnot en las enfriadoras de estudio. Es preciso añadir que el compresor no es una máquina isoentrópica, sino que la entropía aumenta por el paso del fluido a través de la misma. La diferencia de entropía entre la situación ideal del compresor, en la que no varía la entropía dentro de él (2) y la situación real del mismo (2'), define el rendimiento de la máquina. Este rendimiento afecta mucho al COP (Coefficient of Performance) de las enfriadoras, y por ello, se va a hacer un estudio con distintas situaciones para ver cómo varía.

Se van a estudiar tres situaciones:

- Rendimiento del compresor en torno al 90%.
- Rendimiento del compresor en torno al 60%.
- Rendimiento del compresor en torno al 30%.

En la tabla nº171 se pueden ver las condiciones de presión, temperatura y entalpía en cada uno de los puntos termodinámicos del ciclo de Carnot de las enfriadoras de estudio.



| Punto | Descripción                                       | Presión (bar) | Temperatura (°C) | Entalpía (kJ/kg) |
|-------|---|---------------|------------------|------------------|
| 1     | Salida Evaporador / Entrada compresor             | 8,8           | 45,0             | 419,0            |
| 2     | Salida compresor (en caso de ser ideal)           | 19,9          | 84,0             | 433,0            |
| 2'    | Salida compresor (90%) / Entrada condensador      | 19,9          | 87,0             | 434,5            |
| 2''   | Salida compresor (60%) / Entrada condensador      | 19,9          | 89,4             | 445,0            |
| 2'''  | Salida compresor (30%) / Entrada condensador      | 19,9          | 109,0            | 468,1            |
| 3     | Salida condensador / Entrada Válvula de expansión | 19,9          | 78,0             | 313,0            |
| 4     | Salida Válvula de expansión / Entrada evaporador  | 8,8           | 45,0             | 313,0            |

Tabla nº171. Características termodinámicas del ciclo de Carnot en las enfriadoras de estudio, bajo diferentes escenarios.

El diagrama de fases del refrigerante R1324-ZE (Gasservei, n.d.), así como sus puntos de funcionamiento en los equipos calculados se pueden ver en la figura nº87:

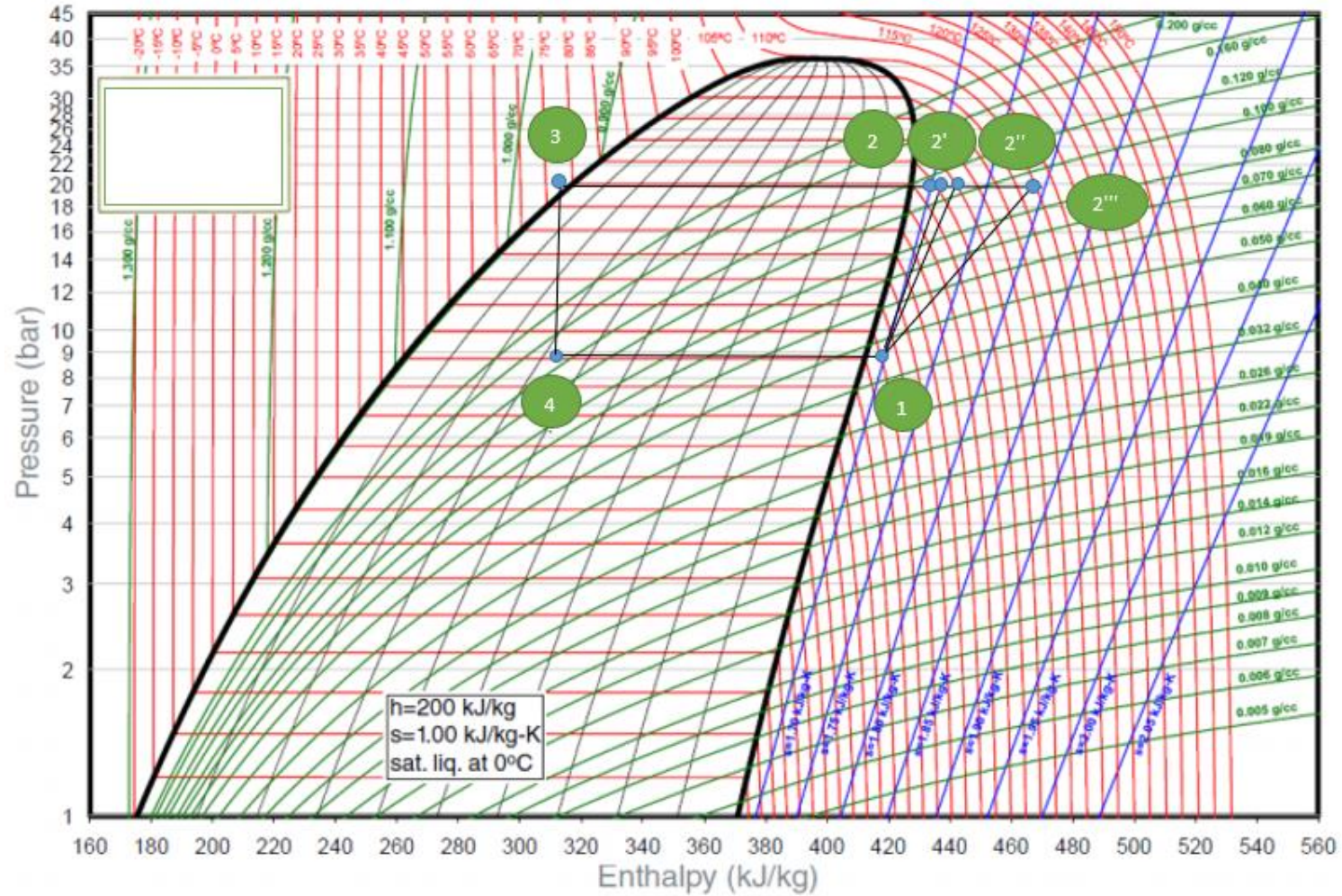


Figura nº87. Diagrama de Carnot del refrigerante de las enfriadoras y sus puntos de funcionamiento (Gasservei, n.d.).



### **Cálculo de los parámetros de las enfriadoras**

Teniendo en cuenta la definición de las condiciones termodinámicas del refrigerante en el ciclo de Carnot, se pueden obtener el resto de los parámetros de cálculo de las enfriadoras. Sin embargo, es preciso establecer una serie de criterios fundamentales para el diseño de las mismas.

1. **Definición del rango de temperatura del agua en el evaporador:** Este rango viene condicionado por la temperatura del agua de mina ( $14,4^{\circ}\text{C}$ ). Se estima que de esta agua se podrán extraer al menos  $5^{\circ}\text{C}$  en el intercambiador de calor de agua de mina (Fernández 2018; García-Carro, F.M. & Solís 2019), por lo tanto, el agua del circuito de evaporadores también tendrá un salto de temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$ .
2. **Definición del rango de temperatura del agua en el condensador:** Este rango es el necesario para cubrir la demanda de los clientes y se les pueda dar un servicio de calefacción y/o agua caliente sanitaria. Según (Arias 2005) este rango está en el entorno de los  $15^{\circ}\text{C}$ , aspecto que se corrobora en los trabajos de (Fernández 2018) y (García-Carro, F.M. & Solís 2019). La temperatura necesaria para satisfacer las necesidades de calefacción de los clientes es de  $75^{\circ}\text{C}$ , ya que la temperatura a la entrada del condensador será de  $60^{\circ}\text{C}$ , debido a las restricciones por la legionela (Lévesque, B., Lavoie, M. & Joly 2004; Yang, X. & Svendsen 2017).
3. **Fijación del número de equipos a disponer en el sistema:** existen dos modalidades de disposición de equipos, con un único equipo que efectúe el salto de temperatura y con dos equipos dispuestos en serie y a contraflujo. Las ventajas de disponer dos equipos en serie y a contraflujo es que, en funcionamiento normal, cada uno de los dos equipos elevan la mitad de la temperatura lo que conlleva que se pueden utilizar equipos de menor entidad y por lo tanto más baratos que en el caso anterior. Además, la versatilidad de la solución aumenta debido a que se reduce el límite mínimo de demanda aceptable por el sistema y, por tanto, se aumentan las potenciales horas de funcionamiento del mismo.

Una vez definidas estas cuestiones y obtenidos los parámetros termodinámicos del ciclo de Carnot, se va a realizar el cálculo del resto de parámetros de las mismas. Se va a desarrollar la solución en la que se obtiene un rendimiento del compresor en la primera enfriadora en torno al 60%, es decir, con la salida del compresor en el punto de funcionamiento 2''.



### Condensadores

En apartados anteriores se ha expresado que el potencial térmico que se puede extraer de un fluido viene dado por la siguiente fórmula (Jardón 2010):

$$P_W = Q \cdot \Delta T \cdot C_S \cdot \rho \quad (1)$$

Donde:

$P_W$  : Potencia térmica del fluido [W]

$Q$  : Caudal o flujo del fluido [l/s]

$\Delta T$  : Incremento de temperatura que experimenta el fluido [°C]

$C_S$  : Calor específico del fluido [J/kg·°C]

$\rho$  : Densidad del fluido [kg/l]

Se ha definido con anterioridad que la potencia térmica máxima necesaria en el agua de los clientes son 1.900 kW, por lo tanto, conociendo el salto total de temperatura (15°C), el calor específico del agua (4,184 J/kg·°C) y su densidad (0,97 kg/l), se puede obtener el caudal del fluido:

$$Q = 31,2 \text{ l/s}$$

Este caudal se puede expresar en términos de caudal másico multiplicándolo por la densidad:

$$\dot{m}_w = 31,2 \text{ kg/s}$$

Este parámetro es muy importante ya que representa el caudal de diseño del circuito de clientes y tiene que ser igual al caudal de diseño del circuito del condensador para que el sistema funcione correctamente.

Si utilizamos la expresión (1) en el condensador, la potencia térmica del fluido se convierte en el calor necesario para producirle al agua del circuito del condensador un salto térmico determinado (Jankovic, Z. Sieres-Atienza, J. & Martínez-Suárez 2015):

$$Q_C = \dot{m}_w \cdot \Delta T \cdot C_S \quad (2)$$

Donde:

$Q_C$  : Calor en el condensador necesario para obtener el salto térmico en el agua del circuito de condensadores [kW]



$\dot{m}_w$  : Caudal másico de agua que atraviesa el condensador [kg/s]

$\Delta T$  : Incremento de temperatura que experimenta el agua del circuito del condensador [°C]

$C_s$  : Calor específico del agua del circuito del condensador [kJ/kg·°C]

Al disponerse dos equipos en serie y a contraflujo cada uno de ellos es capaz de elevar una determinada cantidad la temperatura del agua. Cada enfriadora contribuirá a elevar la temperatura hasta el máximo de su potencia. Para este estudio teórico se va a suponer que las dos enfriadoras dispuestas son iguales, por lo tanto, elevarían ambas la mitad del salto térmico necesario. No se va a disponer exactamente el mismo salto de temperatura para observar los cambios que se producen si se varía un poco el salto de temperatura.

$$\Delta T_{c1} = 7,4^\circ\text{C}, \text{ de } 60^\circ\text{C} \text{ a } 67,4^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{c2} = 7,6^\circ\text{C}, \text{ de } 67,4^\circ\text{C} \text{ a } 75^\circ\text{C}$$

En caso de que se pusieran dos enfriadoras distintas, cada una elevaría la temperatura su parte proporcional teniendo en cuenta las potencias máximas de las mismas.

Teniendo en cuenta un salto térmico de 7,4°C (enfriadora 1), un calor específico de 4.184 J/kg·°C y un caudal másico del agua de 31,2 kg/s, se obtiene que el calor necesario para elevar el agua del circuito del condensador 7,5°C es de 966,00 kW, mientras que en la enfriadora 2 el calor necesario en el condensador para elevar la temperatura del agua 7,6°C es de 992,11 kW.

El calor que recibe el agua en los condensadores es el calor cedido por el refrigerante, el cual tiene la siguiente expresión (Jankovic, Z. Sieres-Atienza, J. & Martínez-Suárez 2015):

$$Q'_c = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{2''} - h_3) \quad (3)$$

Donde:

$Q'_c$  : Calor cedido en el condensador [kW]

$\dot{m}_{ref}$  : Caudal másico del refrigerante en el condensador [kg/s]

$h_{2''}$  : Entalpía a la entrada del condensador [kJ/kg]

$h_3$  : Entalpía a la salida del condensador [kJ/kg]

Sabiendo que  $Q'_c = Q_c$  en ambas enfriadoras (966,00 kW en el caso de la enfriadora 1 y 992,11 kW en el caso de la enfriadora 2) y conociendo las entalpías en todos los puntos del ciclo de Carnot se puede obtener el caudal de refrigerante para ambas máquinas.



$$h_{2''} = 445 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 313 \text{ kJ/kg}$$

Por lo tanto:

El caudal másico del refrigerante en la enfriadora 1:  $m_{ref1} = 7,32 \text{ kg/s}$

El caudal másico del refrigerante en la enfriadora 2:  $m_{ref2} = 7,52 \text{ kg/s}$

### Evaporadores

Del estudio del condensador de las enfriadoras se ha obtenido el caudal del refrigerante en los ciclos de Carnot, caudal que también pasa por el evaporador de las mismas.

Aplicando una fórmula análoga a la fórmula (3) se puede obtener el calor que absorben los refrigerantes en los evaporadores de las dos máquinas. En este caso se utilizan las entalpías a la entrada y a la salida del evaporador (Jankovic, Z. Sieres-Atienza, J. & Martínez-Suárez 2015):

$$Q'_E = m_{ref} \cdot (h_1 - h_4) \quad (4)$$

Donde:

$Q'_E$  : Calor absorbido en el evaporador [kW]

$m_{ref}$  : Caudal másico del refrigerante [kg/s]

$h_1$  : Entalpía a la salida del evaporador [kJ/kg]

$h_4$  : Entalpía a la entrada del evaporador [kJ/kg]

Para la enfriadora 1 los valores de entalpía son los presentados en la tabla nº171, es decir:

$$h_1 = 419 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 313 \text{ kJ/kg}$$

El calor absorbido en el evaporador de la enfriadora 1, es 775,73 kW. Sin embargo, el calor absorbido por el evaporador de la enfriadora 2 no puede calcularse directamente así, sino que se deben realizar una serie de cálculos intermedios.

Los calores absorbidos en los evaporadores hacen disminuir la temperatura del agua que pasa por los mismos, ya que ésta le está traspasando energía térmica al refrigerante. Aplicando la fórmula (2), análogamente a como se ha aplicado en el caso del condensador, se puede obtener el caudal de agua que pasa por el circuito del evaporador.



$$Q_E = m_{we} \cdot \Delta T \cdot C_S \quad (5)$$

Donde:

$Q_E$  : Calor que cede el agua del circuito de evaporación en el evaporador [kW]

$m_{we}$  : Caudal másico de agua que atraviesa el evaporador [kg/s]

$\Delta T$  : Decremento de temperatura que experimenta el agua del circuito de evaporación [°C]

$C_S$  : Calor específico del agua del circuito de evaporación [kJ/kg·°C]

El decremento de temperatura en los evaporadores de las enfriadoras 1 y 2 va a ser muy parecido debido a que se disponen en este ejemplo dos máquinas iguales, sin embargo, no se va a suponer igual para observar las diferencias ocurridas al suponer decrementos de temperatura diferentes:

$$\Delta T_{e1} = 2,6^\circ\text{C}, \text{ de } 9,6^\circ\text{C} \text{ a } 7^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{e2} = 2,4^\circ\text{C}, \text{ de } 12^\circ\text{C} \text{ a } 9,6^\circ\text{C}$$

Conociendo el calor que se cede en el evaporador 1 (775,73 kW), el calor específico del agua (4,184 J/kg·°C) y el incremento de temperatura del agua en el evaporador 1 (2,6°C) se puede hallar el caudal del circuito de evaporación:

$$m_{we} = 71,31 \text{ kg/s}$$

Este caudal es constante en ambos evaporadores. Ahora ya se tienen todos los datos necesarios para calcular el calor en el evaporador 2 aplicando la fórmula 5 de nuevo, la diferencia es el valor del decremento de temperatura, que en este caso es de 2,4°C. Por lo tanto, el calor que cede el agua del circuito de evaporación en el evaporador 2 es:

$$Q_{E2} = 716,06 \text{ kW}$$

Este calor es el mismo que absorbe el refrigerante en el evaporador  $Q'_{E2}$  y por tanto se pueden calcular los parámetros termodinámicos del evaporador 2 aplicando la fórmula (4).

Conociendo  $Q'_{E2}$  (716,06 kW),  $m_{we}$  (71,31 kg/s) y  $h_4$  (se considera que la entalpía a la entrada del evaporador es la misma ya que viene regulada por la válvula de expansión y hace que  $h_4 = h_3$ ), se puede hallar  $h_1$ .

$$h_1 = 408,27 \text{ kW}$$





Este hecho implica que la propia formulación del sistema ha obligado a variar uno de los parámetros termodinámicos de la enfriadora que habían sido fijados en un principio en la tabla nº171. Este es el efecto de haber utilizado incrementos y decrementos de temperatura distintos en los condensadores y evaporadores de las dos enfriadoras.

Como conclusión parcial, se puede indicar que al disponer dos enfriadoras en serie y contraflujo que no son exactamente iguales, se ajustarán los ciclos termodinámicos de las enfriadoras, los caudales de refrigerante y los calores cedidos y absorbidos para mantener que el caudal en los circuitos sea coherente (mismo caudal en ambos evaporadores y mismo caudal en ambos condensadores).

### Compresores

Habiendo definido los caudales del refrigerante y los ciclos termodinámicos en ambas enfriadoras es sencillo obtener el trabajo que ejercen los compresores aplicando una fórmula análoga a (3) y (4):

$$W_{COMP} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{2''} - h_1) \quad (6)$$

Donde:

$W_{COMP}$  : Trabajo desarrollado por el compresor [kW]

$\dot{m}_{ref}$  : Caudal másico del refrigerante [kg/s]

$h_{2''}$  : Entalpía a la salida del compresor [kJ/kg]

$h_1$  : Entalpía a la entrada del compresor [kJ/kg]

Conociendo los caudales de refrigerante de las dos enfriadoras (7,32 kg/s en el caso de la enfriadora 1 y 7,52 kg/s en el caso de la enfriadora 2), así como las entalpías a la entrada y salida del compresor en ambas enfriadoras (313 kJ/kg a la entrada de ambos compresores, 419 kJ/kg a la salida del compresor de la enfriadora 1 y 408,27 kW a la salida del compresor de la enfriadora 2), se pueden obtener los trabajos de ambos compresores:

$$W_{COMP1} = 190,27 \text{ kW}$$

$$W_{COMP2} = 276,05 \text{ kW}$$

El trabajo que realizan los compresores no es ideal ya que no es posible que su rendimiento sea la unidad, por ello, el trabajo que realizan no es isoentrópico. Para conocer el rendimiento



de los compresores, se parte de la entalpía a la salida de los mismos y de la entropía que habría a la salida en caso de que el proceso fuera isoentrópico. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_2'' - h_1)}$$

En el caso de la enfriadora 1,  $h_1$  es igual a 419 kJ/kg y como se puede ver en la tabla nº171, en la enfriadora 2  $h_1$  es igual a 408,27 kJ/kg, por lo tanto, los rendimientos de los compresores son:

$$\eta_{COMP1} = 0,60$$

$$\eta_{COMP2} = 0,71$$

### Válvulas de expansión

No es necesario realizar ningún cálculo en las válvulas de expansión debido a que no realizan trabajo, lo único que hacen es provocar la diferencia de presión entre el condensador y el evaporador manteniendo la entalpía.

### COP de las enfriadoras

Los coeficientes de rendimiento de las enfriadoras (COP, por sus siglas en inglés "Coefficient of Performance"), es la relación entre la potencia térmica que se puede suministrar en el condensador y el trabajo que tiene que hacer el compresor para poder generarla. En resumen, es un coeficiente que relaciona el calor que puede dar una enfriadora con lo que cuesta generar ese calor (Neksa, P., Rekstad, H., Zakeri, G.R. & Schiefloe 1998; Murr, R., Thieriot, H., Zoughaib, A. & Clodic 2011; Magraner, T., Montero, Á., Quilis, S. & Urchueguía 2010).

$$COP = \frac{Q_{CONDENSADOR}}{W_{COMPRESOR}}$$

En el caso de la enfriadora 1, el calor existente en el condensador es de 966,00 kW y el trabajo del compresor es de 190,27 kW, mientras que en la enfriadora 2 el calor existente en el condensador es de 992,11 kW y el trabajo del compresor es de 276,05 kW. Esto implica que las enfriadoras tienen un COP de:

$$COP_1 = 5,08$$

$$COP_2 = 3,59$$

Como resumen de todo el apartado de cálculo de los parámetros de las enfriadoras se presentan varias tablas (nº172 a nº177) en las que se pueden ver resumidos todos los



parámetros calculados. Las celdas resaltadas en verde son los parámetros calculados en esa fila, mientras que los no señalados son datos calculados en apartados anteriores.

Se presentan dos tablas resumen para cada situación (rendimiento del compresor igual a 90%, 60% y 30%), una considerando la potencia máxima, es decir 1.900 kW, y otra considerando la potencia mínima, es decir 500 kW. Los datos recogidos en todas las tablas (nº172 a nº177) han sido calculados de manera análoga a los presentados para la potencia máxima y con un rendimiento de compresor del 60%, presentadas en las páginas anteriores.



| Potencia máxima del sistema – Compresor 60% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                  | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora nº1                              | Condensador 1          | 966,00            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 31,20             | 445,00             | 313,00               | 7,32                       | -           | 5,08 |
|   | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 7,32                       | -           |      |
|   | Evaporador 1           | -                 | 775,73               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 71,31             | 313,00             | 419,00               | 7,32                       | -           |      |
|   | Compresor 1            | -                 | -                    | 190,27                 | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 445,00               | 7,32                       | 0,60        |      |
| Enfriadora nº2                              | Condensador 2          | 992,11            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 31,20             | 445,00             | 313,00               | 7,52                       | -           | 3,59 |
|   | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 7,52                       | -           |      |
|   | Evaporador 2           | -                 | 716,06               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 71,31             | 313,00             | 408,27               | 7,52                       | -           |      |
|   | Compresor 2            | -                 | -                    | 276,05                 | -               | -                  | -                 | -                 | 408,27             | 445,00               | 7,52                       | 0,71        |      |

Tabla nº172. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia máxima y rendimiento del compresor 60%.



| Potencia mínima del sistema– Compresor 60% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                 | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora nº1                             | Condensador 1          | 256,67            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 8,29              | 445,00             | 313,00               | 1,94                       | -           | 5,08 |
|  | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 1,94                       | -           |      |
|  | Evaporador 1           | -                 | 206,12               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 18,95             | 313,00             | 419,00               | 1,94                       | -           |      |
|  | Compresor 1            | -                 | -                    | 50,56                  | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 445,00               | 1,94                       | 0,60        |      |
| Enfriadora nº2                             | Condensador 2          | 263,61            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 8,29              | 445,00             | 313,00               | 2,00                       | -           | 3,59 |
|  | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 2,00                       | -           |      |
|  | Evaporador 2           | -                 | 190,26               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 18,95             | 313,00             | 408,27               | 2,00                       | -           |      |
|  | Compresor 2            | -                 | -                    | 73,35                  | -               | -                  | -                 | -                 | 408,27             | 445,00               | 2,00                       | 0,71        |      |

Tabla nº173. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia mínima y rendimiento del compresor 60%.



| Potencia máxima del sistema– Compresor 90% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                 | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora nº1                             | Condensador 1          | 966,00            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 31,20             | 434,50             | 313,00               | 7,95                       | -           | 7,84 |
|  | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 7,95                       | -           |      |
|  | Evaporador 1           | -                 | 842,77               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 77,47             | 313,00             | 419,00               | 7,95                       | -           |      |
|  | Compresor 1            | -                 | -                    | 123,23                 | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 434,50               | 7,95                       | 0,90        |      |
| Enfriadora nº2                             | Condensador 2          | 992,11            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 31,20             | 433,00             | 313,00               | 8,27                       | -           | 4,38 |
|  | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 8,27                       | -           |      |
|  | Evaporador 2           | -                 | 777,94               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 77,47             | 313,00             | 407,10               | 8,27                       | -           |      |
|  | Compresor 2            | -                 | -                    | 226,57                 | -               | -                  | -                 | -                 | 407,10             | 434,50               | 8,27                       | 0,95        |      |

Tabla nº174. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia máxima y rendimiento del compresor 90%.



| Potencia mínima del sistema– Compresor 90% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|--|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                 | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora nº1                             | Condensador 1          | 256,67            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 8,29              | 434,50             | 313,00               | 2,11                       | -           | 7,84 |
|  | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 2,11                       | -           |      |
|  | Evaporador 1           | -                 | 223,93               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 20,58             | 313,00             | 419,00               | 2,11                       | -           |      |
|  | Compresor 1            | -                 | -                    | 32,74                  | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 434,50               | 2,11                       | 0,90        |      |
| Enfriadora nº2                             | Condensador 2          | 263,61            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 8,29              | 433,00             | 313,00               | 2,20                       | -           | 4,38 |
|  | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 2,20                       | -           |      |
|  | Evaporador 2           | -                 | 206,70               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 20,58             | 313,00             | 407,10               | 2,20                       | -           |      |
|  | Compresor 2            | -                 | -                    | 60,20                  | -               | -                  | -                 | -                 | 407,10             | 434,50               | 2,20                       | 0,95        |      |

Tabla nº175. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia mínima y rendimiento del compresor 90%.



| Potencia máxima del sistema – Compresor 30% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                  | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora n°1                              | Condensador 1          | 966,00            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 31,20             | 468,07             | 313,00               | 6,23                       | -           | 3,16 |
|   | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 6,23                       | -           |      |
|   | Evaporador 1           | -                 | 660,32               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 60,70             | 313,00             | 419,00               | 6,23                       | -           |      |
|   | Compresor 1            | -                 | -                    | 305,68                 | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 468,07               | 6,23                       | 0,32        |      |
| Enfriadora n°2                              | Condensador 2          | 992,11            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 31,20             | 468,07             | 313,00               | 6,40                       | -           | 2,59 |
|   | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 6,40                       | -           |      |
|   | Evaporador 2           | -                 | 609,53               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 60,70             | 313,00             | 408,27               | 6,40                       | -           |      |
|   | Compresor 2            | -                 | -                    | 382,58                 | -               | -                  | -                 | -                 | 408,27             | 468,07               | 6,40                       | 0,44        |      |

Tabla n°176. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia máxima y rendimiento del compresor 30%.





| Potencia mínima del sistema – Compresor 30% |                        |                   |                      |                        |                 |                    |                   |                   |                    |                      |                            |             |      |
|---|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------|------|
| Enfriadora                                  | Equipo                 | Calor cedido (kW) | Calor absorbido (kW) | Trabajo realizado (kW) | Tentr agua (°C) | T salida agua (°C) | Cp agua (J/kg*°C) | Caudal agua (l/s) | H entr ref (kJ/kg) | H salida ref (kJ/kg) | Caudal refrigerante (kg/s) | Rendimiento | COP  |
| Enfriadora nº1                              | Condensador 1          | 256,67            | -                    | -                      | 60,00           | 67,40              | 4.184,00          | 8,29              | 468,07             | 313,00               | 1,66                       | -           | 3,16 |
|   | Válvula de expansión 1 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 1,66                       | -           |      |
|   | Evaporador 1           | -                 | 175,45               | -                      | 9,60            | 7,00               | 4.184,00          | 16,13             | 313,00             | 419,00               | 1,66                       | -           |      |
|   | Compresor 1            | -                 | -                    | 81,22                  | -               | -                  | -                 | -                 | 419,00             | 468,07               | 1,66                       | 0,32        |      |
| Enfriadora nº2                              | Condensador 2          | 263,61            | -                    | -                      | 67,40           | 75,00              | 4.184,00          | 8,29              | 468,07             | 313,00               | 1,70                       | -           | 2,59 |
|   | Válvula de expansión 2 | -                 | -                    | 0,00                   | -               | -                  | -                 | -                 | 313,00             | 313,00               | 1,70                       | -           |      |
|   | Evaporador 2           | -                 | 161,95               | -                      | 12,00           | 9,60               | 4.184,00          | 16,13             | 313,00             | 408,27               | 1,70                       | -           |      |
|   | Compresor 2            | -                 | -                    | 101,65                 | -               | -                  | -                 | -                 | 408,27             | 468,07               | 1,70                       | 0,44        |      |

Tabla nº177. Parámetros de las enfriadoras para la situación de potencia mínima y rendimiento del compresor 30%.



### 7.4.1.3. *Discusión de resultados*

Como se puede observar en las tablas nº172 a nº177 cuanto más se aleja el funcionamiento del compresor del de un compresor ideal, es decir, isoentrópico, menor es el COP y menor es el caudal que se necesita para circular por el evaporador. En la tabla nº178 se recogen los resultados obtenidos en el estudio de variación del rendimiento del compresor.

| <b>Comparación situaciones rendimiento compresor</b> |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| <b>Rendimiento compresor</b>                         | 90%   | 60%   | 30%   |
| <b>Entalpía salida Compresor (kJ/kg)</b>             | 434,5 | 445,0 | 468,1 |
| <b>COP Enfriadora 1</b>                              | 7,84  | 5,08  | 3,16  |
| <b>COP Enfriadora 2</b>                              | 4,38  | 3,59  | 2,59  |
| <b>Caudal Condensador (l/s)</b>                      | 31,2  | 31,2  | 31,2  |
| <b>Caudal Evaporador (l/s)</b>                       | 77,47 | 71,31 | 60,7  |

Tabla nº178. Comparación de parámetros termodinámicos en distintas situaciones de rendimientos del compresor.

En la figura nº88 se puede ver la variación del COP en la enfriadora 1 para distintos porcentajes de rendimiento del compresor. Esta relación es prácticamente lineal.

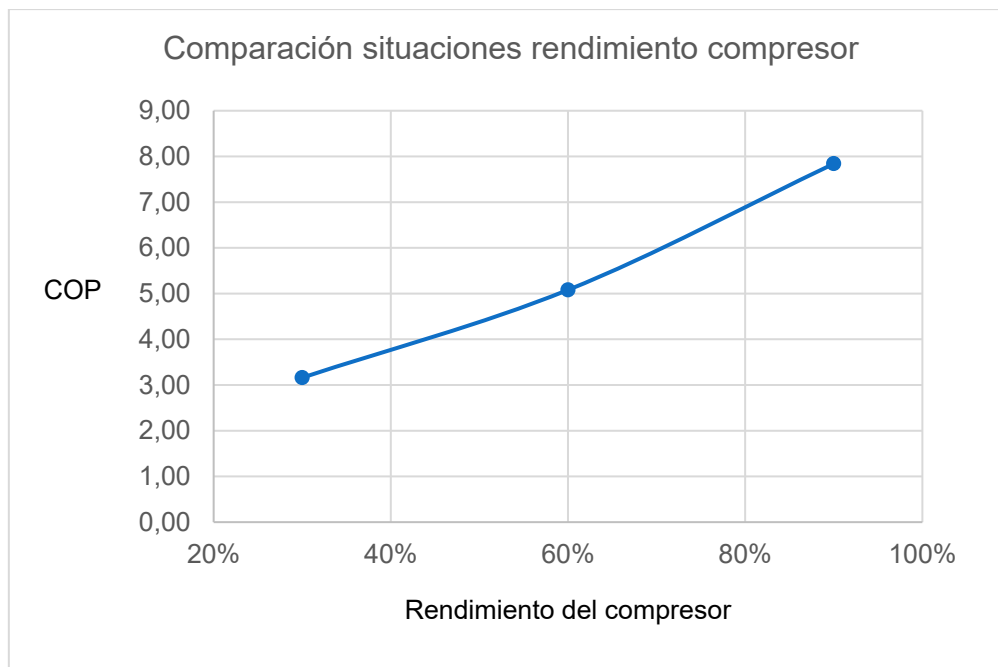


Figura nº88. Variación del COP de la enfriadora 1 con el rendimiento del compresor.



El rendimiento del compresor es uno de los parámetros clave en el diseño de las enfriadoras, ya que afecta enormemente al COP, tal y como se ha demostrado en este estudio. Por lo tanto, se debe tener muy en cuenta para poder optimizar el rendimiento de la instalación.

Para el dimensionamiento del resto del sistema se va a considerar la situación más desfavorable, es decir, la situación en la que el COP de las enfriadoras es más bajo. De esta manera, los caudales para el dimensionamiento del resto de equipos son:

- Caudal en el circuito de evaporación: 60,7 l/s.
- Caudal en el circuito de condensación: 31,2 l/s.



#### 7.4.2. Intercambiador de calor de agua de mina

Los intercambiadores de calor son equipos que realizan un intercambio de calor entre dos o más fluidos (Bhatt, D.J., Priyanka, M.J. & Prakash 2014; Vasauskas, V. & Baskutis 2006). Este intercambio se produce al poner en contacto los mencionados fluidos con una superficie que transmite el calor de un fluido al otro (Shah, R.K. & Sekilic 2003).

Los fluidos pueden fluir a ambos lados de la superficie en el mismo sentido o en el sentido contrario, buscando en todo caso la mayor eficiencia posible en la transferencia de calor. (Singh, S. & Jakhar 2014). Esto se traduce en buscar el mínimo área de transferencia que consigue el intercambio de calor deseado entre ambos fluidos, esto es así para reducir los costes del equipo al máximo.

##### 7.4.2.1. Selección del tipo de intercambiador

Existen muchos tipos de intercambiadores distintos utilizados en procesos industriales. Entre los más destacados se pueden encontrar (Larowski, A. & Taylor 1983):

- Intercambiadores de calor de carcasa y tubo.
- Intercambiadores de placas.
- Intercambiadores de calor enfriados por aire.
- Intercambiadores de placas en espiral (Trom 1995; Alfa-Laval 2005).
- Intercambiadores de calor lamelar.
- Intercambiadores de calor de aleta de placa (Dehghandokht, M., Fartaj, A. & Sanaye 2011).
- Intercambiadores de calor de tubos enrollados o intercambiadores de calor de Hampson (Huminic, G. & Huminic 2011).
- Intercambiadores de calor de doble tubo.
- Intercambiadores de calor de grafito.
- Intercambiadores de calor de superficie raspada (Kew 1991).

Los intercambiadores de calor de tubo y carcasa son los más utilizados en el sector industrial (Chisholm 1980), debido a su versatilidad, su robustez y su fiabilidad (Costa, A.L.H. & Queiroz 2008). Sin embargo, los intercambiadores de placas están siendo cada vez más comunes en el sector industrial y químico desplazando en algunos casos a los intercambiadores de tubo y carcasa (Asadi, M., & Ramin 2013).

Se van a comparar los dos tipos de intercambiador más frecuentemente usados, el intercambiador de tubo y carcasa y los intercambiadores de placas.

### Intercambiador de tubo y carcasa

Este tipo de intercambiadores destacan por su extendida inmersión en el mercado, el contrastado establecimiento de su buen funcionamiento, diseño y procesos de fabricación. Esto permite que se puedan producir este tipo de intercambiadores en muchos tamaños y para muchos fines distintos, así como para un gran rango de temperaturas y presiones (Kuppan 2000).

Consisten fundamentalmente en una serie de tubos paralelos y de pequeño diámetro que se soldan a una placa y se introducen en una carcasa. El agua que circula por los tubos transmite el calor al agua que circula por la carcasa (Larowski, A. & Taylor 1983).

Este tipo de intercambiadores están clasificados y se fabrican según lo dictado por la TEMA (Asociación de fabricantes de intercambiadores tubulares) (Bhatt, D.J., Priyanka, M.J. & Prakash 2014). Las tolerancias, los modos de fabricación, los distintos tipos, las normas de buenas prácticas, etc. vienen recogidas en las normas que publica la TEMA siendo la más reciente (TEMA 2007).

En la figura nº89 se puede ver un intercambiador de tubo y carcasa con cabezales fijos muy utilizado en industria por ser el más barato de fabricar entre todos los intercambiadores de tubo y carcasa posibles (Mukherjee 1998).

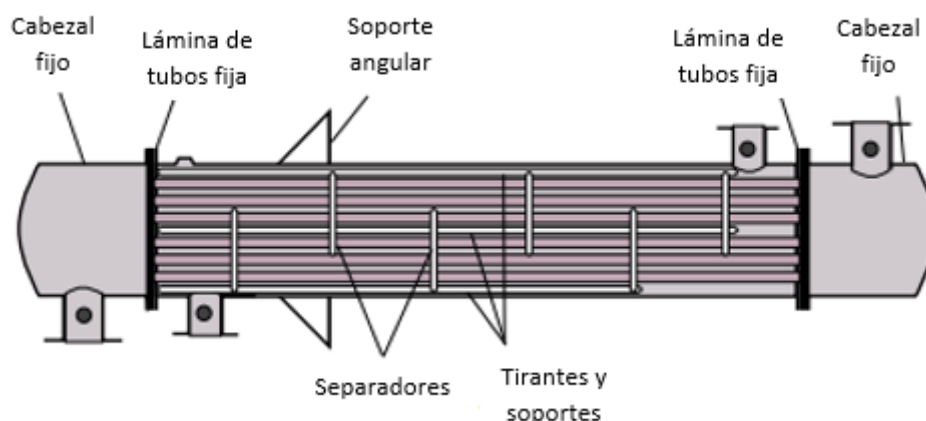


Figura nº89. Intercambiador de tubo y carcasa con cabezales fijos (BEM). Adaptado de (Mukherjee 1998).



### Intercambiador de placas

Este tipo de intercambiadores consisten en un conjunto de placas corrugadas hechas de metal que están en contacto. Cada una de las placas tiene cuatro aperturas que sirven de entrada y salida para los fluidos que pasan a través de ellas no permitiendo el contacto entre los mismos. Los fluidos circulan por los huecos dejados por las corrugas en placas alternativas. Las placas están montadas sobre un bastidor y están selladas mediante juntas que evitan el contacto entre los fluidos (Kuppan 2000).

Las corrugas de las placas proporcionan un soporte mecánico y aseguran la turbulencia necesaria para mejorar la transferencia de calor a la vez que se reducen los incrustamientos. Además, la velocidad de los fluidos es menor que en los intercambiadores de tubo y carcasa, por ello, se consigue una mejor transferencia de calor. El flujo en este tipo de intercambiadores es eminentemente a contraflujo, lo que quiere decir, que el flujo caliente y el flujo frío circulan en direcciones opuestas. Las placas son fácilmente limpiables ya que pueden sacarse del intercambiador y ser limpiadas, además, pueden ser fabricadas en muchos tipos de materiales. Las juntas es la parte del intercambiador más problemática y suponen su mayor limitación, debido a que los fabricantes aún no han conseguido fabricar juntas que puedan aguantar un elevado rango de presión y temperatura de manera fiable. Los límites pueden estar en el entorno de los 200°C y los 25 kg/cm<sup>2</sup> (Larowski, A. & Taylor 1983). En la figura nº90 se puede ver la disposición típica de un intercambiador de placas.

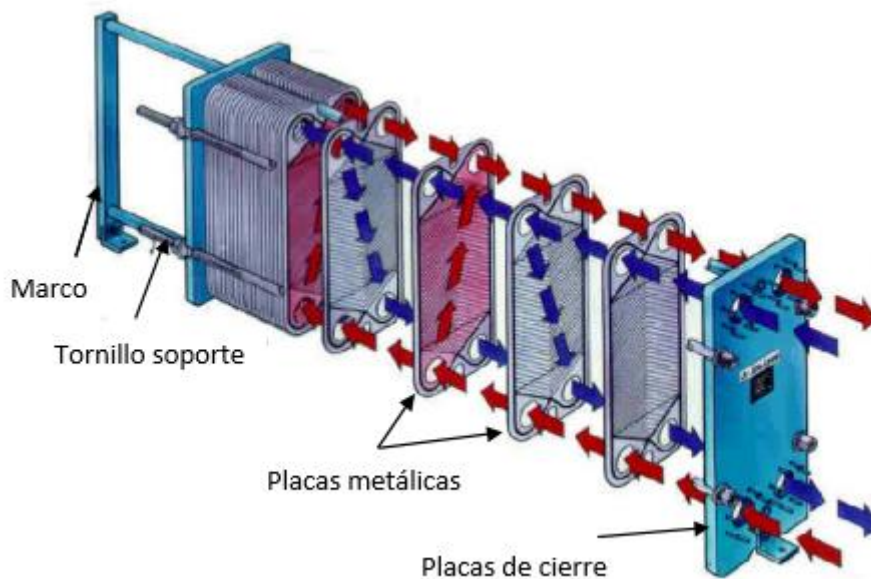


Figura nº90. Intercambiador de placas y su funcionamiento.



### Comparación entre intercambiadores

En este apartado se comparan los dos tipos de intercambiador antes señalados, es decir, los intercambiadores de calor de tubo y carcasa y los intercambiadores de placas. A continuación, se resumen sus principales ventajas y desventajas (McGeorge 2012):

#### Ventajas de los intercambiadores de carcasa y tubo

1. Son más competitivos económicamente que los intercambiadores de placas.
2. Puede utilizarse en condiciones de operación con mayores presiones y temperaturas.
3. La caída de presión en los equipos es menor.
4. Es sencillo realizar una prueba de presión en los mismos, por lo tanto, es fácil encontrar fugas.

#### Desventajas de los intercambiadores de carcasa y tubo

1. La transferencia de calor es menos efectiva que en intercambiadores de placas.
2. Su limpieza y su mantenimiento pueden ser complicadas de ejecutar.
3. La capacidad del intercambiador no puede aumentarse.
4. Requiere mayor espacio de implantación.

#### Ventajas de los intercambiadores de placas

1. La transferencia de calor es más efectiva que en los intercambiadores tubulares.
2. Su limpieza y mantenimiento son sencillos de ejecutar.
3. La capacidad del intercambiador puede aumentarse añadiendo placas por parejas.
4. Se trata de un intercambiador compacto que requiere poco espacio de implantación y necesita poco espacio extra para el desmantelamiento.
5. Las placas que fuguen se pueden sustituir en parejas sin necesidad de cambiar el intercambiador.
6. Responde mejor frente al incrustamiento debido a su mayor flujo turbulento.

#### Desventajas de los intercambiadores de carcasa y tubo

1. Los costes iniciales del intercambiador son mayores debido a los costes de materiales de las placas.
2. Las condiciones de presión y temperatura están limitadas por la capacidad de las juntas.
3. La caída de presión ocasionada por el equipo es mayor que en el caso de los intercambiadores de tubo y carcasa.



4. La identificación de fugas no es fácil debido a que no es sencillo realizar una prueba de presión.
5. El montaje y el desmantelamiento del equipo debe hacerse por personal muy especializado.
6. Un apriete excesivo de los tornillos del intercambiador resulta en una mayor pérdida de carga.
7. Las juntas se pueden deteriorar y deben ser repuestas cada cierto tiempo.
8. En caso de utilizar placas de titanio o de cualquier otro metal noble, se puede ocasionar corrosión en el sistema hidráulico.

En la bibliografía consultada se han encontrado numerosos ejemplos en los que se demuestra que los intercambiadores de calor de placas funcionan mejor que los de tubo debido a su mejor transferencia térmica (Walraven, D., Laenen, B. & D'Haeseleer 2014; Vasauskas, V. & Baskutis 2006; Bhavani, M., Kanthimathi, T., Surya, A. & Nagendra 2017; Bani, A. & Peschel 2012; Asadi, M., & Ramin 2013). Sin embargo, la mayoría coinciden en que están más extendidos en el mercado los intercambiadores de tubo y carcasa y que su funcionamiento es correcto en la mayoría de las ocasiones (Kumar, A., & Saini 2017; Al-Haj 2012; Costa, A.L.H. & Queiroz 2008).

Su gran establecimiento comercial, sus menores costes iniciales, así como su fiabilidad y la utilización de este tipo de intercambiadores en situaciones similares (Fernández 2018; García-Carro, F.M. & Solís 2019) son las principales razones por las que se prefiere utilizar un intercambiador de tubo y carcasa para la red de calor de Villablino.

#### **7.4.2.2. *Diseño del intercambiador de agua de mina***

Las recomendaciones a seguir para el correcto dimensionamiento de un intercambiador de tubo y carcasa se recogen en la normativa de la asociación de los fabricantes de intercambiadores de calor tubulares (TEMA) (Edwards 2008). Sin embargo, este texto es extenso y con muchos detalles relacionados con la fabricación, por lo tanto, se han seguido las recomendaciones de (Mukherjee 1998) para diseñar eficientemente este tipo de intercambiadores.

El objetivo del diseño de un intercambiador de carcasa y tubos es dimensionar cada uno de sus elementos para conseguir la transmisión de calor entre los dos fluidos que circulan a través del mismo de la manera más eficiente posible (Singh, S. & Jakhar 2014).





### Partes de un intercambiador de tubo y carcasa

Las partes más importantes de un intercambiador de calor son las siguientes:

- Carcasa (A). Se trata del compartimento, generalmente de forma cilíndrica, que aloja los tubos y los separadores. Se hace circular por este compartimento un fluido que participará en la transferencia de calor.
- Tubos (B). Se alojan en el interior de la carcasa y el intercambio de calor se produce a través de sus paredes, ya que por el interior de los tubos circula un fluido y por el exterior otro.
- Separadores (C). Se tratan de unos elementos que se alojan en el interior de la carcasa y sirven para sostener estructuralmente a los tubos, mantener una velocidad de flujo en carcasa aceptable y prevenir el fallo de los tubos por vibraciones inducidas (Mukherjee 1998).
- Cabezales (D). Se trata de los compartimentos que se encuentran a ambos extremos de la carcasa por donde entra y sale el fluido de los tubos (frontal y trasero). En el caso de que solo haya un cabezal porque el fluido que discurre por el interior de los tubos entre y salga por el mismo extremo del intercambiador, tendríamos un intercambiador de calor en U (Mukherjee 1998).
- Soportes (E). Son los elementos responsables de sostener el intercambiador.
- Hoja de tubos (F). Todos los tubos están soldados a una o más placas, dependiendo de si el intercambiador es en U o no, que separan los cabezales de la carcasa. Esta placa es la hoja de tubos y dependiendo de su tipología pueden ser fijos o flotantes. En el caso de ser fijos, se suelda esta hoja a la carcasa y no permite la limpieza mecánica de los tubos, por lo que se procedería a realizar limpiezas químicas. Si tiene uno fijo y otro flotante se permite la expansión de los tubos dentro de la carcasa y además se permite su limpieza mecánica.
- Partición (G). Se da solo en intercambiadores en U y sirve para separar los flujos de entrada y de salida de los tubos en el cabezal frontal.

En la figura nº91 se pueden ver las partes del intercambiador de tubo y carcasa antes mencionadas:

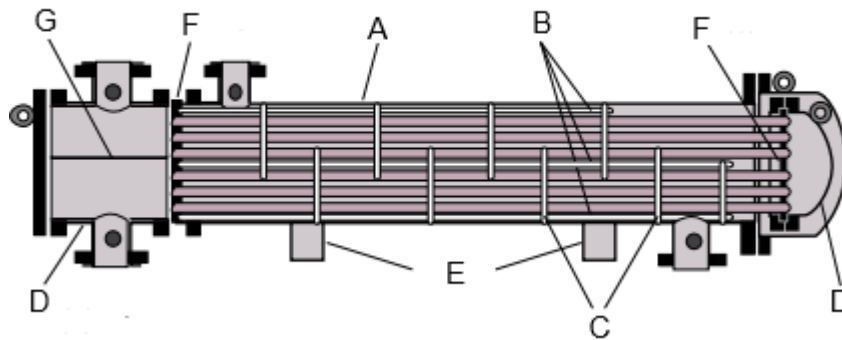


Figura nº91. Intercambiador de tubo y carcasa (Mukherjee 1998).

(TEMA 2007) recoge diversas configuraciones de intercambiador a tener en cuenta. Cada tipo de intercambiador se denomina con 3 letras (XYZ) dependiendo de los componentes que lo conforman. Los tres componentes a tener en cuenta para clasificar los intercambiadores son:

- Cabezal frontal (siempre fijos) (X).
- Carcasa (Y).
- Cabezal trasero (Z).

En la tabla nº179 se recogen los diversos tipos de componentes que se pueden utilizar para crear los intercambiadores de calor:

| Nomenclatura TEMA para intercambiadores tubulares |  |  |                    |   |                             |   |   |
|---|--|--|--------------------|---|-----------------------------|---|---|
|   | Tipos de cabezales delanteros                    |  | Tipos de carcassas |   | Tipos de cabezales traseros |   |   |
| A   | Canales y tapa móvil                             |  | E                  | De un paso                              |                             | L | De tubo fijo para tipo "A"                |
| B   | Tapa integral                                    |  | F                  | De dos pasos con separador longitudinal |                             | M | De tubo fijo para tipo "B"                |
| C   | Cabezal y tubos integrales con tapa móvil        |  | G                  | De flujo separado                       |                             | N | De tubo fijo para tipo "C"                |
| N   | Canal, cabezal y tubos integrales con tapa móvil |  | H                  | De flujo separado doble                 |                             | P | Cabezal flotante de llenado exterior      |
| D   | Cabezal especial para altas presiones            |  | J                  | De flujo dividido                       |                             | S | Cabezal flotante con dispositivo de apoyo |
|   |  |  | D                  | De tipo caldera recalentadora           |                             | T | Cabezal flotante sustituible              |
|   |  |  | X                  | De flujo cruzado                        |                             | U | Haz tubular en U                          |
|   |  |  |                    |   |                             | W | Cabezal flotante sellado externamente     |

Tabla nº179. Nomenclatura TEMA para intercambiadores de calor tubulares.

En la figura nº92 se pueden ver croquisados los distintos tipos enumerados en la tabla nº179.

| Cabezales delanteros |                            | Tipos de carcasa |                             | Cabezales traseros |                              |
|----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|
| A                    | <br>Canales y tapa móvil   | E                | <br>De un paso              | L                  | <br>Tubo fijo tipo "A"       |
| B                    | <br>Tapa integral          | F                | <br>De dos pasos            | M                  | <br>Tubo fijo tipo "B"       |
| C                    | <br>Cabezal y tubos        | G                | <br>De flujo separados      | N                  | <br>Tubo fijo tipo "C"       |
| N                    | <br>Canal, cabezal y tubos | H                | <br>De flujo separado doble | P                  | <br>Cabezal flotante llenado |
| D                    | <br>Especial para altas    | J                | <br>De flujo dividido       | S                  | <br>Cabezal flotante disp.   |
|                      |                            | K                | <br>Caldera recalentadora   | T                  | <br>Cabezal flotante         |
|                      |                            | X                | <br>De flujo cruzado        | U                  | <br>Haz tubular en U         |
|                      |                            |                  |                             | W                  | <br>Cabezal flotante llenado |

Figura nº92. Nomenclatura TEMA para intercambiadores de calor tubulares. Adaptado de (TEMA 2007).

De esta manera, un intercambiador BGM es un intercambiador de calor de tubo y carcasa con cabezal integral, de flujo separado y con cabezal trasero fijo.



### Datos de diseño

Los datos de diseño a tener en cuenta cuando se pretende llevar a cabo el dimensionamiento de un intercambiador de calor de tubo y carcasa son los siguientes (Mukherjee 1998):

- Los caudales tanto en la carcasa como en los tubos.
- Las temperaturas de entrada y de salida del intercambiador en ambos fluidos (caliente y frío).
- La presión de operación.
- La caída de presión permitida tanto en el lado carcasa como en el lado tubos.
- La resistencia al incrustamiento (Asadi, M. & Ramin 2013).
- Las propiedades físicas de los fluidos de trabajo: entre estas propiedades se incluyen la viscosidad, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico.
- La carga térmica esperada.
- El tipo de intercambiador: según las tres letras que utiliza (TEMA 2007) para clasificarlos.
- Las dimensiones de los tubos de entrada.
- Las dimensiones de los tubos del haz tubular, tanto diámetro de tubos como longitud.
- Las dimensiones de la carcasa, tanto diámetro como longitud.
- Materiales de construcción para todos los componentes.
- Consideraciones especiales como, por ejemplo, si la operación es en continuo o se interrumpe, si hay condiciones de operación alternativas, etc.

### Criterios de diseño

En el presente apartado se van a definir una serie de criterios de diseño que serán utilizados en los cálculos posteriores (Mukherjee 1998):

- Diámetro de la carcasa: depende del tipo de intercambiador de tubo y carcasa, uno de cabeza flotante puede tener una carcasa de diámetro hasta 1,40 o 1,50 m., mientras que uno de cabezales fijos puede tener un diámetro de carcasa de hasta 3,00 m.
- Longitud de los tubos: también depende del tipo de intercambiador, lo normal para uno de cabeza flotante es tener una longitud de tubos de entre 6 y 9 m., mientras que uno de cabezales fijos puede tener una longitud de tubos de hasta 12,00 m.
- Diámetro de tubos mínimo: debe ser superior a  $\frac{3}{4}$  de pulgada para evitar problemas de incrustación, por su limpieza y para evitar vibraciones innecesarias (Edwards 2008).

- Pérdida de carga: se limita a  $0,7 \text{ kg/m}^2$  por carcasa. Si se tienen dos carcasas en serie, la pérdida de carga del conjunto puede ser  $1,4 \text{ kg/m}^2$ .
- Resistencia al incrustamiento: se han utilizado los valores recomendados por (TEMA 2007). Para el caso del agua de mina se va a utilizar el valor recomendado del factor de incrustamiento en pozos o agua de abastecimiento, es decir,  $0,001 \text{ BTU/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{F}$ , o lo que es lo mismo,  $0,00017 \text{ m}^2\text{K/W}$ .
- Velocidades de los fluidos, tanto en los distintos tramos de la carcasa como en los tubos. La velocidad mínima en general debiera ser  $1 \text{ m/s}$ , aunque podría aceptarse hasta  $0,5 \text{ m/s}$  en casos excepcionales. Las velocidades máximas deben rondar los  $2,5 - 3 \text{ m/s}$ . Por último, las velocidades de flujo transversal y de ventana en la carcasa deben ser similares, no admitiéndose una diferencia superior al 20% entre las mismas.
- Patrones en la disposición de tubos: en casos en los que el lado de la carcasa pueda ensuciarse suele ser recomendable utilizar patrones cuadrangulares ( $90^\circ$ ), aunque esto hace que disminuya la turbulencia del agua, por tanto, si el número de Reynolds es inferior a 2.000, se suele utilizar un patrón cuadrangular rotado ( $45^\circ$ ). Sin embargo, los patrones triangulares ( $30^\circ$  y  $60^\circ$ ) producen una mayor transmisión térmica. En la figura nº93 se pueden ver los patrones que se pueden utilizar:

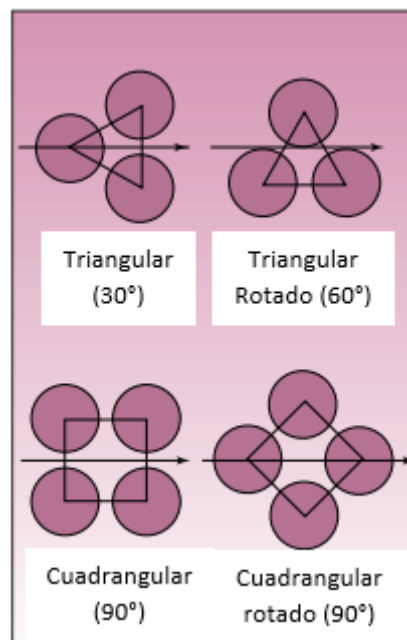


Figura nº93. Patrones de disposición de tubos. Adaptado de (Mukherjee 1998).

- Distancia entre tubos: la distancia mínima que marca (TEMA 2007) entre tubos es 1,25 veces el diámetro del tubo. En general, se tiende a utilizar la mínima distancia entre tubos posible para hacer más compacto el intercambiador, sin embargo, no siempre



va en beneficio del diseño debido a que en ocasiones la única manera que se tiene para bajar la pérdida de carga es aumentar esta distancia (Mukherjee 1998).

- Distancia entre separadores: La distancia mínima entre separadores especificada por (TEMA 2007) es un quinto del diámetro de la carcasa o dos pulgadas, el valor que sea más alto. Sin embargo, el efecto de la separación entre separadores afecta tanto a la pérdida de carga como a la transmisión de calor (aumentándolas cuando se acercan los separadores). Por lo tanto, la reducción de la separación entre separadores potencia un efecto negativo (pérdida de carga) y un efecto positivo (transmisión de calor), lo que indica que habrá un valor óptimo en el que ambos efectos se compensen, esto se produce cuando la distancia entre separadores es entre el 30% y el 60% del diámetro de la carcasa.
- Corte del separador: este parámetro se define como la altura del segmento circular que deja el separador para que circule el agua dentro de la carcasa. Para asegurar una correcta velocidad y régimen de flujo esta altura debe estar entre el 20% y el 35% del diámetro total de la carcasa (Mukherjee 1998). En la figura n°94 se puede ver un ejemplo.

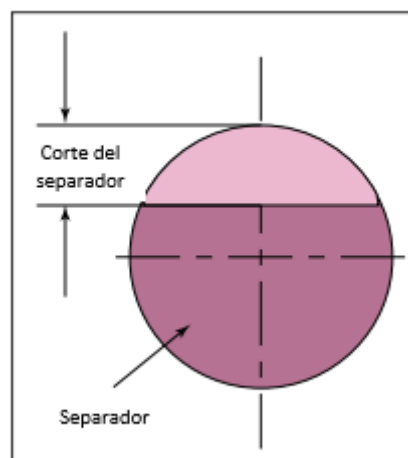


Figura n°94. Corte de un separador. Adaptado de (Mukherjee 1998).

En la figura n°95 se pueden observar distintas situaciones dependiendo del parámetro “corte del separador”. En ella se distinguen tres situaciones:

- a) El corte del separador es muy pequeño.
- b) El corte del separador es muy grande.
- c) El corte del separador es óptimo.

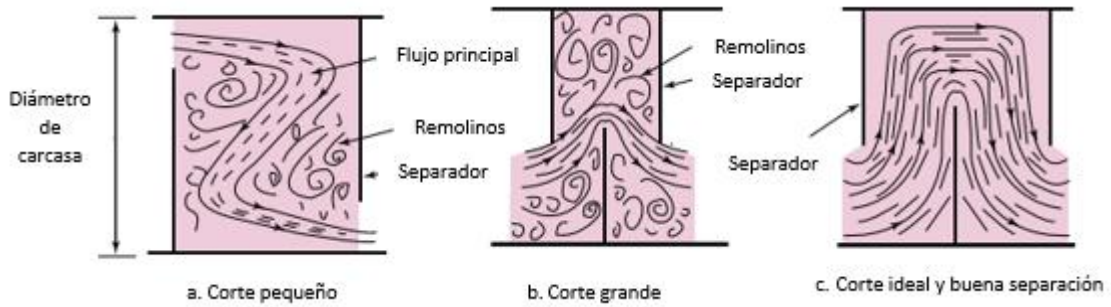


Figura nº95. Efectos del corte de los separadores en el flujo del fluido. Adaptado de (Mukherjee 1998).

En la imagen a. de la figura nº95 se puede ver que existe mucha zona de turbulencia y remolinos haciendo que el flujo principal transversal dentro de la carcasa no sea óptimo. En el caso de la imagen b. se muestra el efecto de un espaciamiento muy pequeño entre separadores y es que se producen remolinos en la parte exterior de la carcasa limitándose el flujo transversal a una pequeña parte en la zona central. Por último, en la imagen c se ve un flujo transversal correcto no existiendo grandes zonas de remolinos.

- Flujos a contracorriente o en el mismo sentido: La decisión de utilizar fluidos a contracorriente en el mismo sentido es importante debido a que en ningún caso se pueden igualar las temperaturas de ambos fluidos en el mismo punto del intercambiador. Esto implica que, en caso de que se dispongan fluidos en el mismo sentido, la temperatura de salida del fluido frío no podrá superar la temperatura de salida del fluido caliente. En la figura nº96 se refleja este efecto:

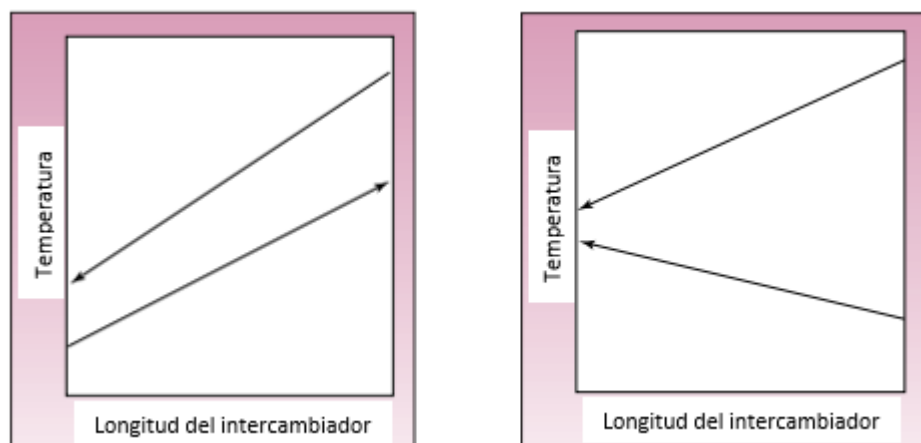


Figura nº96. Variación de temperatura y flujos en distinto y mismo sentido en el intercambiador. Adaptado de (Mukherjee 1998).

En la imagen de la izquierda de la figura nº96 se pueden ver dos fluidos en sentidos opuestos representados por las flechas. La temperatura de salida del fluido frío puede



ser mayor que la de salida del fluido caliente ya que las salidas se producen en lados opuestos del intercambiador. Sin embargo, en la imagen de la derecha se pueden ver dos flujos que discurren en el mismo sentido y, por lo tanto, la temperatura de salida del fluido frío no puede ser mayor que la de salida del fluido caliente.

### **Cálculos y resultados**

Se ha procedido a realizar el diseño del intercambiador de agua de mina en la red de calor de Villablino teniendo en cuenta los criterios de cálculo antes estipulados. El cálculo de estos equipos se suele ejecutar mediante programas especializados (Larowski, A. & Taylor 1983), debido a su complejidad. En este caso se ha utilizado el programa HTRI Xchanger Suite 7 - HON: se trata de un software para dimensionar, simular y diseñar una amplia gama de intercambiadores de calor desarrollado por Heat Transfer Research, Inc.

El objetivo del cálculo es diseñar un intercambiador que realice una transmisión de calor lo más eficiente posible dentro de los parámetros de trabajo que se tienen.

### **Datos de partida**

Los datos de los que se ha partido para realizar el cálculo y que son inamovibles debido a las condiciones de operación de la red de calor son los siguientes:

- Temperatura de entrada y salida del fluido caliente (agua de mina): La temperatura de entrada del agua de mina de montaña de Calderón son 14,4°C según la campaña de campo llevada a cabo durante los años 2018 y 2019 (Matas, A., García-Carro, F. & Loredó 2018a). Se limita la variación de temperatura en la transferencia de calor en 5°C, por lo tanto, la temperatura de salida del fluido caliente serán 9,4°C.
- Temperatura de entrada y salida del fluido frío (circuito del evaporador): La temperatura del agua de salida del fluido frío no puede ser tan alta como la de entrada del fluido caliente y se han supuesto al menos 2°C de diferencia, por lo tanto, la temperatura de salida del fluido frío es de 12°C. El salto térmico debe ser igual que en el fluido caliente, en consecuencia, la temperatura del fluido frío son 7°C.
- Caudal del circuito del fluido frío (circuito del evaporador): 60,7 l/s.
- Caudal del circuito del fluido frío (circuito de agua de mina): se prefiere utilizar el mismo caudal para ambos circuitos para evitar problemas en la optimización del cálculo, es decir, 60,7 l/s.





El resto de los parámetros de partida han sido fijados según recomendaciones bibliográficas e hipótesis razonables según los criterios de diseño estipulados, no obstante, han estado sujetos a modificaciones en la optimización del intercambiador:

- La presión de operación: se ha fijado en el entorno de 300 kPa.
- La caída de presión permitida tanto en el lado carcasa como en el lado tubos: se ha fijado en  $0,7 \text{ kg/cm}^2$  por carcasa, o lo que es lo mismo, 68,647 kPa.
- La resistencia al incrustamiento: siguiendo las recomendaciones del documento (TEMA 2007) para agua en pozos, se ha fijado en  $0,00017 \text{ m}^2/\text{kW}$ .
- Las propiedades físicas de los fluidos de trabajo: entre estas propiedades se incluyen la viscosidad, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico: Se han utilizado los parámetros del agua líquida.
- El tipo de intercambiador: en la primera aproximación se ha optado por un intercambiador AEL (TEMA 2007) consistente en un cabezal frontal con canal y tapa móvil, una carcasa de un paso y un cabezal trasero fijo.
- Las dimensiones de los tubos de entrada: Se considera un diámetro de tubos de entrada de 8" porque es lo que se estima que va a ser necesario para los circuitos hidráulicos dentro de la sala de generación.
- Las dimensiones de los tubos del haz tubular: Se considera un diámetro interior de tubos de tres cuartos de pulgada, es decir 19,05 mm y una longitud de 6,096 m.
- Las dimensiones de la carcasa: Se considera un diámetro interior de carcasa de 336 mm.
- Para la primera estimación se consideran seis carcasas disponiendo un sistema de 3x2 habiendo tres carcasas en paralelo y dos en serie.
- Disposición de tubos: Se considera cuadrangular simple (45') en una primera instancia.
- Separación entre tubos: Se considera 25 mm de separación entre tubos, algo superior al límite mínimo marcado por (TEMA 2007).
- Distribución de separadores: Para la primera aproximación se considera una distribución de separadores simple con una separación entre ellos de 151,20 cm. correspondiendo al 45% del diámetro de la carcasa y un corte del 25% del diámetro interior de la carcasa.
- El flujo considerado en todo momento es a contracorriente.



## Resultados

Se presentan en este apartado los resultados correspondientes a las diversas revisiones de cálculo efectuadas hasta hallar la configuración óptima del intercambiador. Ha habido un total de tres simulaciones (revisión 00, revisión 01 y revisión 02), en las que se han ido variando los parámetros vistos en el punto anterior para obtener un sobredimensionamiento, una pérdida de carga y unas velocidades dentro del intercambiador aceptables.

En el anexo de informes de cálculo se incluyen las hojas de diseño “rating” del conjunto del intercambiador en todas las revisiones y la hoja TEMA de la última revisión.

### Primera simulación (Rev00)

En esta revisión se introducen los datos de entrada vistos en el apartado anterior y se comprueba que se tiene una pérdida de carga excesiva ( $188,50 \text{ kPa} > 137,294 \text{ kPa} = 68,647 \text{ kPa} * 2$  carcassas). También se comprueba que no se tiene la suficiente superficie de transferencia (sobredimensionamiento = -51,16%). Por otro lado, las velocidades “shellside”, “tubeside”, “crossflow” y “window” son 0,81 m/s, 0,97 m/s, 1,17 m/s y 1,75 m/s respectivamente.

### Segunda simulación (Rev01)

Se varían los parámetros y geometría del intercambiador para mejorar el sobredimensionamiento y la pérdida de carga. Se mantiene una configuración 3x2 correspondiente a 3 carcassas en paralelo y dos carcassas en serie.

Se modifica la configuración de tubos pasando de “tube pattern” 45 (-51,16% de overdesign) a “tube pattern” 30 (-45,88%). Por lo tanto, se mejora la situación, pero no lo suficiente. Además, aumenta la pérdida de carga a 230,14 kPa, volviéndose inadmisibles. Por otro lado, las velocidades “shellside”, “tubeside”, “crossflow” y “window” son 0,96 m/s, 0,84 m/s, 1,59 m/s y 1,89 m/s respectivamente.

### Tercera simulación (Rev02)

En vez de cambiar la configuración de los tubos de 45 a 30, se mantiene 45, pero se cambia a configuración 2 paralelo y 3 en serie, lo que mejora el sobredimensionamiento (-38,67%) pero se aumenta la pérdida de carga ( $268,37 \text{ kPa} > 205,92 \text{ kPa} = 68,647 \text{ kPa} * 3$  carcassas permitidos). No obstante, mejoran las velocidades “shellside”, “tubeside”, “crossflow” y “window” (0,90 m/s, 1,26 m/s, 1,19 m/s y 1,73 m/s respectivamente).

Se tiene que aumentar el tamaño de las carcassas de  $DI=336\text{mm}$  a  $DI=520\text{mm}$  pasando de -38,67% a 0,93% de dimensionamiento. Además, se ha disminuido la separación de los baffles



de  $0,45 \cdot DI$  de carcasa a  $0,3 \cdot DI$  de carcasa. La caída de presión es de  $93,79 \text{ kPa} < 205,92 \text{ kPa}$  permitidos. Las velocidades se ven ligeramente reducidas (“*shellside*”, “*tubeside*”, “*crossflow*” y “*window*” son  $0,61 \text{ m/s}$ ,  $0,50 \text{ m/s}$ ,  $0,75 \text{ m/s}$  y  $0,66 \text{ m/s}$  respectivamente). Son todas ellas superiores a  $0,50 \text{ m/s}$ , por lo tanto, se consideran aceptables. Además, se comprueba que no hay una diferencia superior al 20% entre velocidades “*crossflow*” y “*window*”.

Al cumplirse todos los parámetros vistos en los criterios de cálculo de manera razonable y resultar un sobredimensionamiento adecuado, se considera que el intercambiador de calor está bien diseñado.

#### 7.4.2.3. *Discusión de los resultados*

Tras realizar las diversas simulaciones se observa que la actuación más efectiva para aumentar la velocidad en las distintas partes del intercambiador es reducir el número de carcacas en paralelo. Este hecho hace que no se reparta tanto el flujo del fluido y, por tanto, aumente la velocidad del fluido en el intercambiador. Este cambio no afecta a la pérdida de carga considerada por el TEMA (ya que estipula un máximo de pérdida de carga por carcaca), pero sí afecta a la pérdida de carga del conjunto del intercambiador.

Por otro lado, se observa que la manera más efectiva de aumentar la transferencia de calor del intercambiador es aumentar el diámetro de la carcaca y aumentar el número de tubos que se meten en la carcaca. No obstante, esto afecta a la velocidad reduciéndola en gran medida, por lo que se debe tener cuidado y llegar a un equilibrio.

#### 7.4.3. *Depósito térmico*

Se plantea la disposición de un depósito térmico debido a la diferencia entre el caudal demandado por las enfriadoras, en concreto por el circuito de evaporación ( $60,7 \text{ l/s}$ ), y el caudal medio anual que emana naturalmente por la bocamina de la mina de montaña de Calderón ( $51,17 \text{ l/s}$ ). Al ser menor el caudal disponible al demandado se va a construir un depósito de regulación que almacene el agua de mina y mantenga su temperatura.

##### 7.4.3.1. *Volumen necesario en el depósito térmico*

Como se ha visto en apartados anteriores, la demanda punta se da en horas puntuales de la mañana en invierno, por lo tanto, se considera que con que se mantenga el caudal que



proporciona la demanda máxima (caudal de diseño) durante cuatro horas se puede cubrir la demanda solventemente.

El ritmo de vaciado del volumen será de 9,53 l/s debido a que este número es la diferencia entre los caudales de entrada y de salida (60,7 l/s – 51,17 l/s). Si se requiere que, partiendo del depósito lleno, el depósito tarde en vaciarse al menos cuatro horas, entonces el volumen del depósito debe ser de al menos 10,59 m<sup>3</sup>, según la siguiente fórmula:

$$V = \frac{Q \cdot t}{3,6}$$

Siendo:

$V$  = Volumen del depósito (m<sup>3</sup>)

$Q$  = Diferencia entre los caudales de entrada y salida (l/s).

$t$  = Tiempo que tarda el depósito en vaciarse (h)

#### **7.4.3.2. Diseño del depósito térmico**

El depósito de almacenamiento térmico que se va a disponer en la red de calor de Villablino va a ser un depósito cilíndrico enterrado de PRFV de 2 metros de diámetro y 4 metros de longitud. Estas dimensiones garantizan un volumen de 12,56 m<sup>3</sup> superior a los 10,59 m<sup>3</sup> calculados en el apartado anterior.

El depósito se dispondrá en posición horizontal y tendrá doble pared. Además, estará calorifugado con lana de roca (Fan, J. & Furbo 2012) y tendrá un cable calefactor para asegurar que no se pierde la temperatura del agua de mina (Dimamex 2017). También dispondrá de una boca de hombre para el acceso al mismo y las aberturas necesarias para introducir y extraer el agua de mina.



## 7.5. SISTEMAS DE CONDUCCIONES Y CIRCUITOS HIDRÁULICOS

La red de calor de Villablino está compuesta por los siguientes equipos y circuitos hidráulicos que los conectan:

1. Conducciones desde la bocamina hasta el depósito térmico.
2. Depósito térmico.
3. Circuito de agua de mina: está formado por bombas hidráulicas, las conducciones de impulsión que las unen con el intercambiador de calor de agua de mina y las correspondientes conducciones de retorno.
4. Intercambiador de calor de agua de mina.
5. Circuito de los evaporadores: está formado por las conducciones que unen el intercambiador de calor de agua de mina con los evaporadores de las enfriadoras. También se incluyen las bombas hidráulicas que impulsan el agua del circuito.
6. Enfriadoras.
7. Circuito de los condensadores: está formado por las conducciones que unen los condensadores de las enfriadoras con el separador hidráulico de la sala de generación. También se incluyen las bombas hidráulicas que impulsan el agua del circuito.
8. Separador hidráulico.
9. Circuito de clientes: está formado por las conducciones que unen el separador hidráulico de la sala de generación con las distintas salas técnicas de los clientes. También se incluyen las bombas hidráulicas que impulsan el agua del circuito.
10. Salas técnicas de los clientes. Cada sala técnica cuenta con una subestación de intercambio que separa las conducciones y equipos existentes en la sala técnica en dos subsistemas:
  - a. Circuito primario: conducciones y equipos existentes dentro de la sala técnica que une la subestación y el circuito que viene de la sala de generación. En este circuito se encuentra la válvula micrométrica que servirá para regular el caudal que pasa por el circuito de cada cliente.
  - b. Circuito secundario: conducciones y equipos existentes en la sala técnica que une la subestación con la instalación existente del cliente. Cuenta con una bomba hidráulica elevadora que sirve para la recirculación del agua del circuito.



### 7.5.1. Conducciones

Las conducciones de una red de calor conforman uno de los elementos fundamentales ya que deben transportar el agua caliente desde la sala de generación hasta cada uno de los clientes sin permitir que el fluido que transportan pierda su temperatura. Los límites de la pérdida de temperatura los establece el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del gobierno de España (Ministerio de la Presidencia 2007) y sus actualizaciones (Ministerio de la Presidencia 2013).

Este tipo de tuberías deben ir calorifugadas para perder la menor temperatura posible mediante espuma de poliuretano (Dalla-Rosa, A., Li, H. & Svendsen 2011).

Se contemplan dos tipos de tubería para llevar a cabo la red de calor:

- Tubería metálica calorifugada (García-Carro, F.M. & Solís 2019; Ajah, A.N., Patil, A.C., Herder, P.M. & Grievink 2007).
- Tubería plástica calorifugada (Fernández 2018)

La principal ventaja de las tuberías plásticas son sus buenas prestaciones térmicas, facilidad de montaje en obra y flexibilidad para salvar obstáculos en la puesta en obra. Sin embargo, tiene problemas de durabilidad a partir de 80°C, en cuyo caso la vida útil solo se asegura hasta los 25 años (Italsan 2016).

Por el contrario, las tuberías metálicas pueden utilizarse con temperaturas mayores sin afectar a su durabilidad (por encima de 85°C). No obstante, su puesta en obra es más compleja que la de las tuberías plásticas y es un sistema poco flexible a cambios en el trazado, lo que supone un problema para el contratista que fuera a ejecutar la obra. Por otra parte, es cierto que este tipo de tuberías resultan algo más ventajosas económicamente, para los mismos diámetros, que las tuberías plásticas, teniendo únicamente en cuenta el tubo. Se ha llegado a esta conclusión tras consultar las tarifas de diversos fabricantes de tuberías plásticas, como Italsan (Italsan 2020), y de tuberías metálicas como Isoplus y Logstor (ofertas particulares).

Los rangos de temperaturas de la red de calor de Villablino están dentro de los parámetros abarcables por las tuberías plásticas, por lo tanto, se considerará una mejor opción frente a las tuberías metálicas por sus mayores facilidades en la puesta en obra y sus ventajas económicas.



### 7.5.2. Circuito de distribución

El circuito de distribución conecta la sala de generación con los distintos puntos de entrega de la red de calor, los cuales se detallan a continuación:

- Ayuntamiento de Villablino (AY).
- Casa de la cultura de Villablino (CC).
- Centro de Salud Valle Laciana (CS).
- Polideportivo de Villablino (PD).
- Colegio Público San Miguel (CP).
- Edificio principal del Instituto de Educación Secundaria Obispo Argüelles (IES A).
- Edificio entrada del Instituto de Educación Secundaria Obispo Argüelles (IES B).
- Gimnasio del Instituto de Educación Secundaria Obispo Argüelles (IES C).

La red cuenta con un total de 10.885,52 metros distribuidos en tuberías de polipropileno preaisladas de diámetros que varían entre el DN90 y DN250.

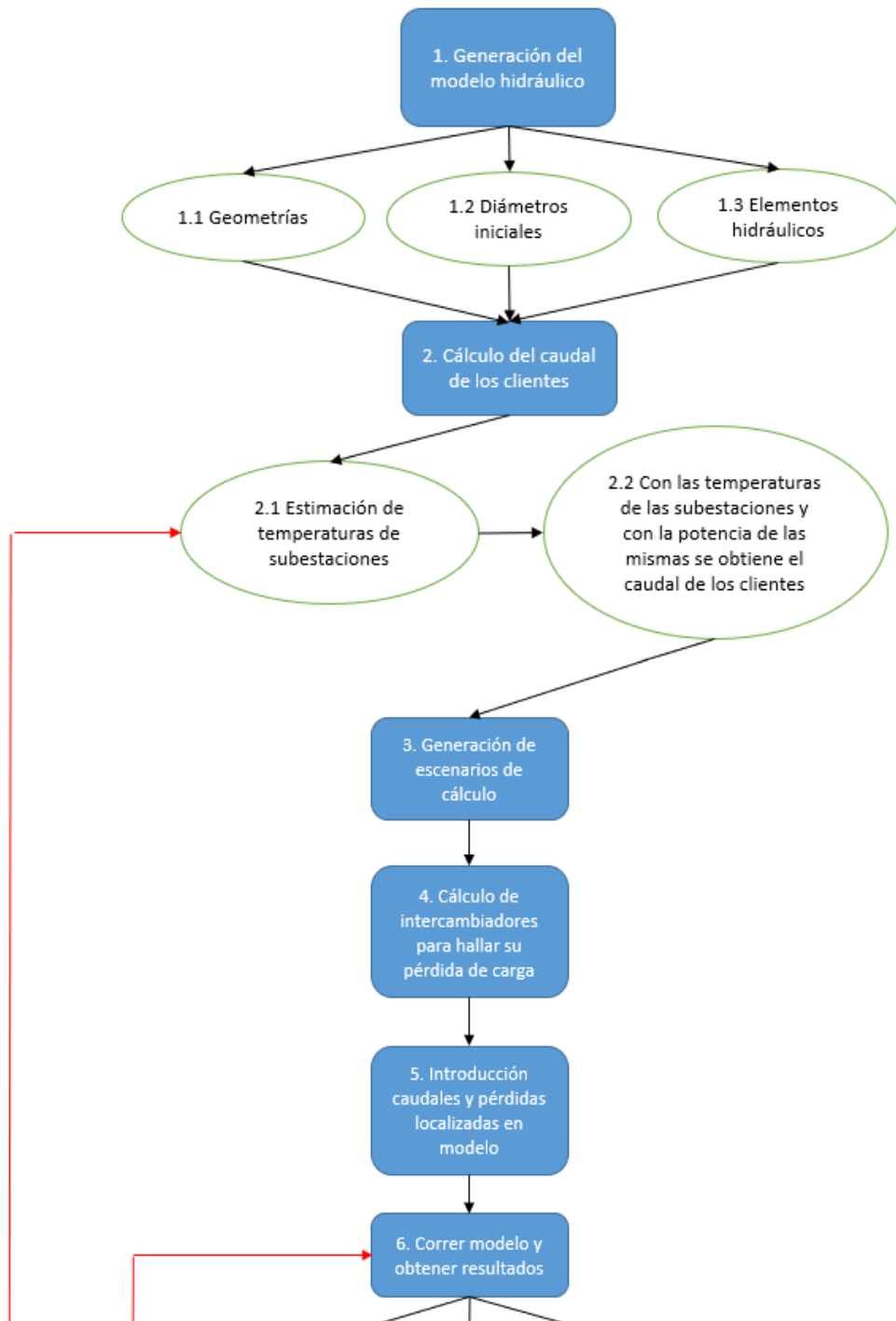
#### 7.5.2.1. Metodología general

Se ha modelizado el circuito mediante el programa EPANET 2.0 desarrollado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos de América con sede en Cincinnati, Ohio.

El objetivo del cálculo es dimensionar el circuito hidráulico que garantice la cobertura de la demanda térmica de cada uno de los clientes. Se dimensionará la estación de bombeo necesaria para impulsar el agua desde la sala de generación, creando de esta forma un circuito cerrado. Se tendrá en cuenta, a su vez, el cálculo la pérdida de carga generada en toda la longitud de la conducción y la generada en los accesorios de la red y las instalaciones singulares (subestaciones de intercambio).

#### Proceso iterativo de cálculo

En este apartado se va a presentar un diagrama de flujo del proceso iterativo necesario para calcular el circuito de distribución (figura nº97):





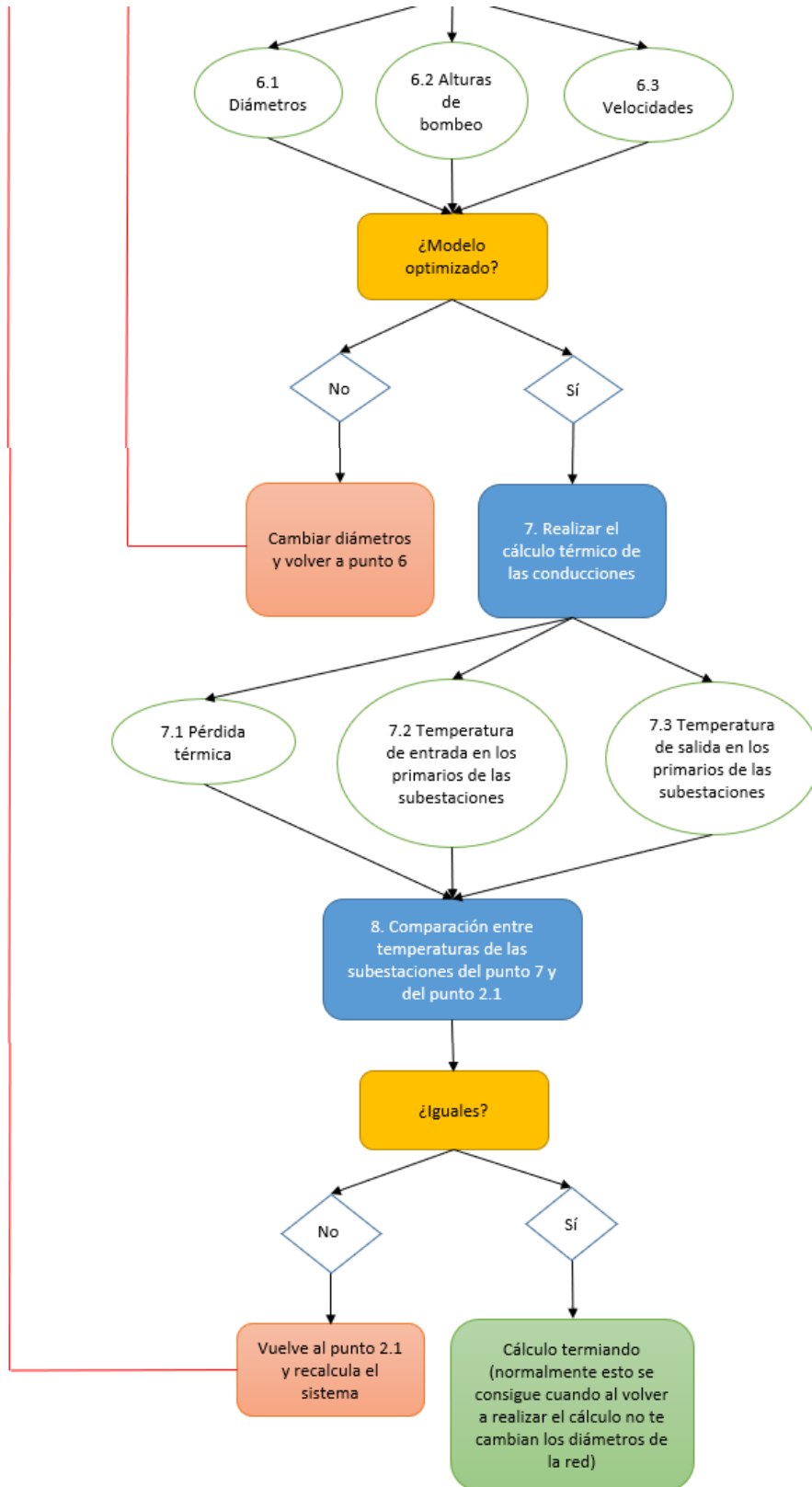


Figura nº97. Metodología propia utilizada en el cálculo del circuito de distribución.



### Pérdidas de carga

La expresión utilizada para calcular las pérdidas de carga continuas de las conducciones es la siguiente:

$$j = \frac{f v^2}{D 2g}$$

conocida como ecuación de Darcy – Weisbach (Martínez 2000).

El parámetro  $f$  se denomina factor de fricción y tradicionalmente, se ha calculado mediante la ecuación de Colebrook y White (Martínez 2000).

La fórmula de Colebrook-White tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 - 2 \times \log \left[ \frac{e}{D} + \frac{9,35}{Re \sqrt{f}} \right]$$

Donde,

$f$ , es el factor de fricción

$e$ , es la rugosidad interna de la tubería

$D$ , es el diámetro interno de la tubería

$Re$ , es el número de Reynolds

El factor de fricción para flujo turbulento es calculado mediante la fórmula de Colebrook-White, mientras que para flujo laminar el cálculo es mediante la expresión  $f = 64/Re$ .

El valor de la rugosidad adoptado para las tuberías Compuestas RP PP-R RP - Raised Pressure FIBER BLUE SDR9/Serie 4 de Italsan, contempladas en el cálculo es 0,007 mm (Italsan 2016).

También es necesario tener en cuenta las pérdidas de carga localizadas que se generan en la tubería debido a accesorios como codos, válvulas o estrechamientos. Este tipo de pérdidas, denominadas también pérdidas menores, se expresan, de forma general, como una fracción de altura de velocidad (Martínez 2000). Su expresión general es, por tanto:

$$h_i = k_i \frac{v^2}{2g}$$

Siendo  $h_i$  la pérdida de carga,  $v$  la velocidad aguas abajo de la zona de alteración y  $k_i$  un coeficiente adimensional, que depende en general del número de Reynolds y de otros parámetros en función del tipo de elemento de que se trate.



Es una práctica extendida entre los calculistas hidráulicos la estimación del conjunto de pérdidas de carga localizadas como una ampliación equivalente de la longitud de la conducción, aplicándose por tanto la fórmula de la pérdida de carga continua a las dimensiones ampliadas.

Se estima un aumento del 30% de la longitud de las conducciones.

#### 7.5.2.2. Modelo

El modelo introducido en el programa reproduce la geometría real de la red de calor de Villablino. Las conducciones discurren por carreteras y caminos públicos para evitar lo máximo posible la afección a parcelas privadas.

La disposición de conducciones se ha llevado a cabo siguiendo Google Earth y queda como se muestra en la figura nº98:

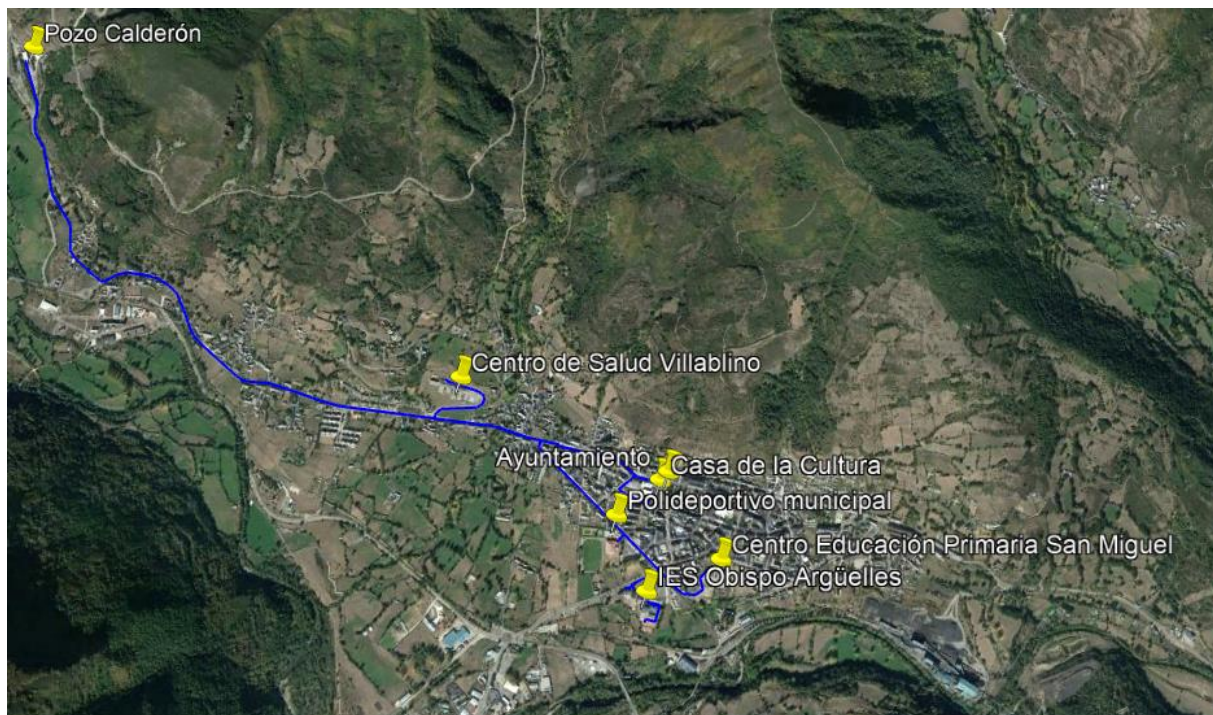


Figura nº98. Ortofoto con las conducciones de la red de calor de Villablino.

Las conducciones introducidas en el modelo se muestran en la figura nº99:

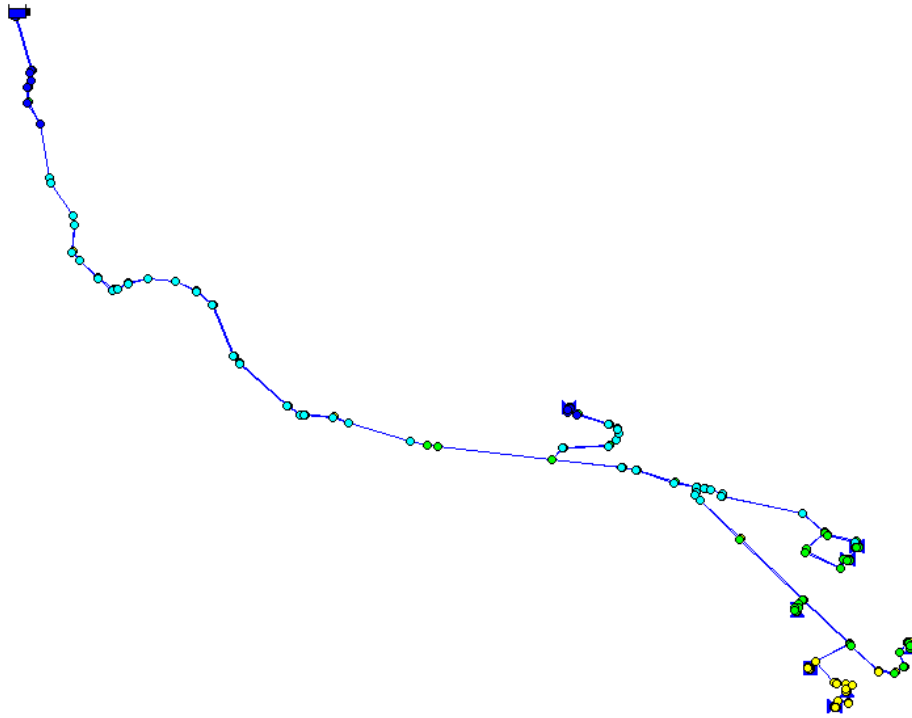


Figura nº99. Geometría del modelo introducido en EPANET.

En el modelo se representan tanto las conducciones de ida como las de retorno, separadas aproximadamente un metro entre ellas para que se puedan distinguir.

En la sala de generación, situada en las instalaciones del Pozo Calderón, se ubica la estación de bombeo con dos bombas en disposición 2+1, es decir, dos bombas trabajando en paralelo y una de reserva. En el modelo únicamente se introducen las dos bombas en paralelo, tal y como se ve en la figura nº100:

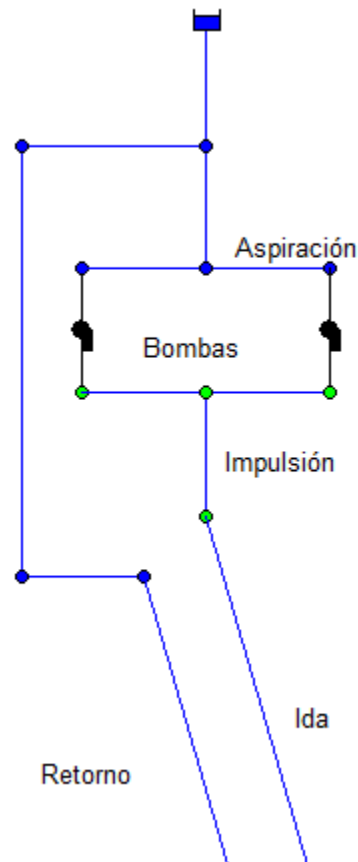


Figura nº100. Modelización hidráulica de las bombas del circuito de distribución en la sala de generación del pozo Calderón.

Como se puede observar en la figura nº100, la tubería de ida sale de la impulsión de las bombas (nodos en verde) y la tubería de retorno se conecta a la aspiración de las mismas (nodos en azul).

En cada uno de los clientes se ha simulado la estación de intercambio con dos válvulas:

- Válvula micrométrica de regulación de caudal situada a la entrada de la subestación y que ejerce el control del caudal de admisión de la misma.
- Válvula que ejerce una pérdida de carga determinada igual a la pérdida de carga calculada para las subestaciones y reflejada anteriormente.

La tubería de ida llega a la válvula micrométrica, luego pasa por la subestación y posteriormente se conecta a la línea de retorno, como se muestra en la figura nº101:

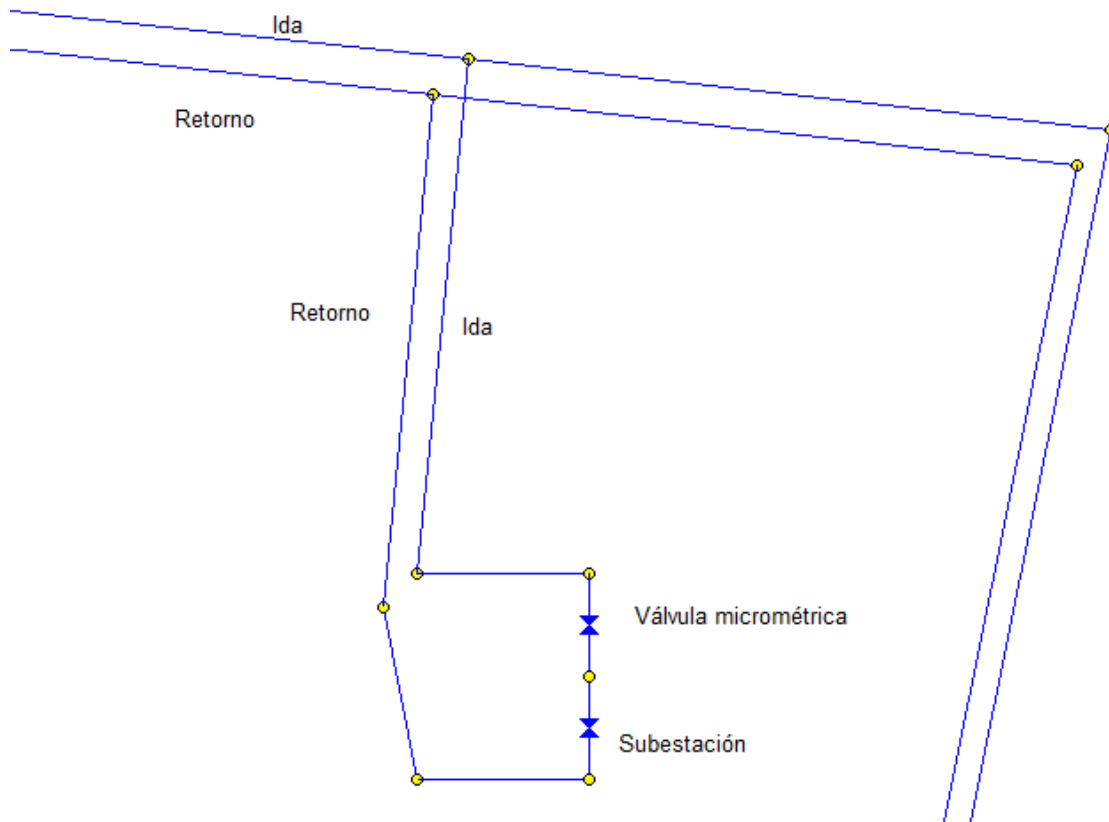


Figura nº101. Sala técnica IES A conectada a la red.

La tubería de ida es la que se refleja por arriba y entra en la sala por la derecha, pasa por la válvula micrométrica y la subestación. Por último, regresa a la red por la izquierda y sigue por debajo de la tubería de ida.

En la figura nº102 se puede ver el ramal del Centro de Salud Valle de Laciana ampliado.

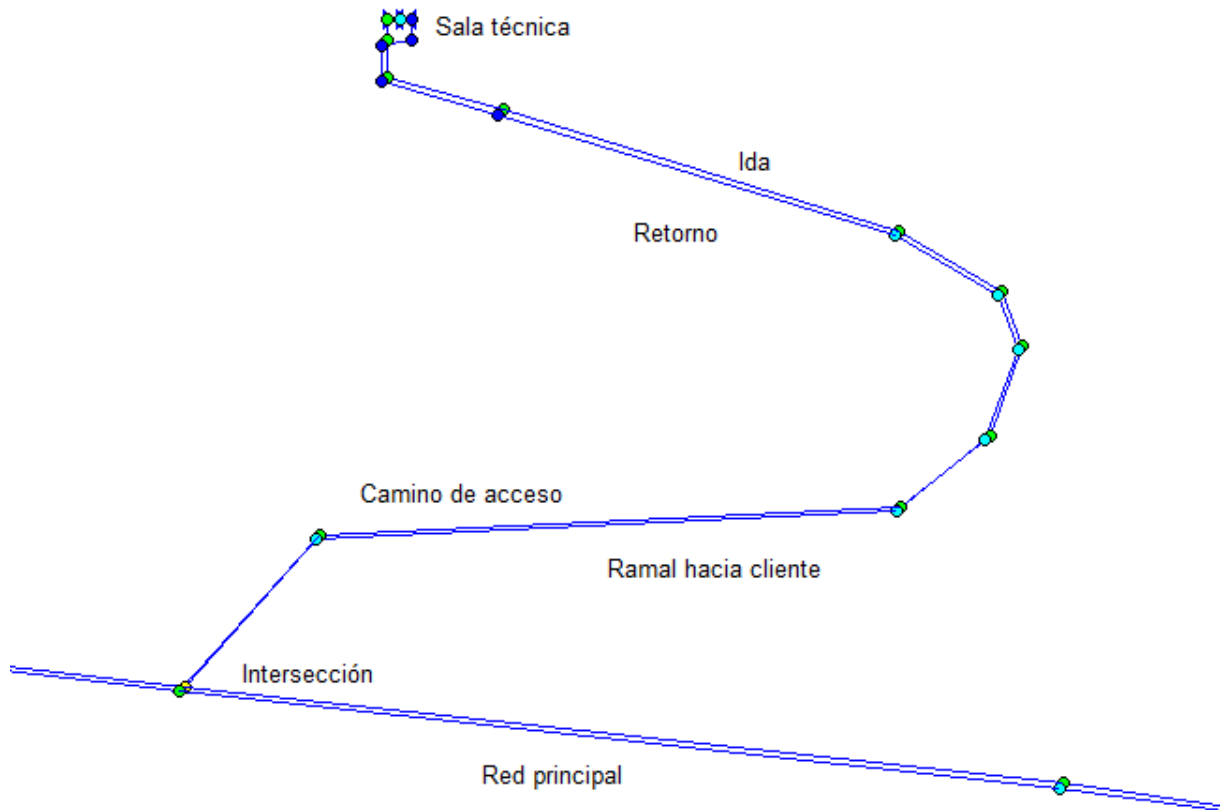


Figura nº102. Modelización del ramal del Centro de Salud.

### 7.5.2.3. Datos de partida

Los datos de partida que necesita el programa son los siguientes:

- Nudos
  - Identificación de los nudos.
  - Coordenadas de los nudos (X,Y,Z).
  - Demanda en cada uno de los nudos, si corresponde (l/s).
  - Tipo de nudo (1: nudo de caudal; 2: embalse; 3: depósito)
- Líneas
  - Identificación de líneas.
  - Inicio y fin de línea, haciendo referencia expresa a los nudos que conecta.
  - Longitud de la línea.
  - Diámetro interior de la tubería.
  - Rugosidad de la tubería: 0,007 mm (Italsan 2016).



- Tipo de línea (1: tubería; 2: bomba; 3 válvula).

Además de estos datos, dependiendo del tipo de nudo o línea se puede necesitar la introducción de datos auxiliares como, por ejemplo:

- Depósito: volumen del depósito.
- Bomba: curva de la bomba.
- Válvula: tipo de válvula y consigna.

### Caudales del circuito y parciales

El circuito de distribución está separado hidráulicamente del circuito de condensación por medio de un separador hidráulico cuyo objetivo es independizar los caudales de ambos circuitos, en caso necesario. No obstante, el sistema funcionará de manera óptima cuando el caudal de ambos circuitos sea el mismo, ya que no existirán corrientes inducidas dentro del separador (Romanov, D.O. & Yavorovsky 2019).

El caudal del circuito de condensación viene fijado por el dimensionamiento de las enfriadoras y es igual a 31,2 l/s, por lo tanto, el caudal del circuito de clientes será:

$$Q_{\text{distr}} = 31,2 \text{ l/s.}$$

Si recopilamos la información mostrada en apartados anteriores, este es el caudal que hace que se cubra razonablemente la demanda térmica de los clientes, pero no corresponde con el 100% de la cobertura de la demanda. En caso de que todos los clientes demanden el máximo de su potencia térmica a la vez, los sistemas auxiliares existentes en todas las salas técnicas de los mismos deberán complementar al abastecimiento geotérmico.

Se puede dar la situación que un cliente demande su potencia máxima mientras que otros no lo hagan; en este supuesto, el sistema geotérmico será capaz de abastecer ese pico de demanda de un cliente en concreto y, en consecuencia, la red hidráulica debe estar dimensionada para esta situación.

Se plantean seis escenarios diferentes. Cada uno de ellos correspondiente a que un cliente distinto demande su potencia máxima. Cuando esto pase, el caudal geotérmico se tendrá que repartir entre el resto de los clientes de manera proporcional.

Para definir el reparto de caudales en los escenarios planteados se han recopilado las demandas máximas de cada cliente y se ha visto su importancia relativa con el resto de las demandas.





| Subestaciones de intercambio |               |                 | Primario           |                    | Secundario         |                    |
|------------------------------|---------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Edificio                     | Potencia (kW) | Uso             | T <sup>a</sup> ent | T <sup>a</sup> sal | T <sup>a</sup> ent | T <sup>a</sup> sal |
| IES Obispo Argüelles A       | 393           | Calefacción+ACS | 71,8               | 62,6               | 57,6               | 66,8               |
| IES Obispo Argüelles B       | 192           | Calefacción+ACS | 71,9               | 62,5               | 57,5               | 66,9               |
| IES Obispo Argüelles C       | 149,5         | Calefacción+ACS | 71,7               | 62,7               | 57,7               | 66,7               |
| Ayuntamiento                 | 127,2         | Calefacción     | 72,0               | 62,4               | 57,4               | 67,0               |
| Casa de la Cultura           | 107,18        | Calefacción     | 71,8               | 62,5               | 57,5               | 66,8               |
| Centro de Salud              | 1031,2        | Calefacción+ACS | 72,6               | 62,0               | 57,0               | 67,6               |
| Colegio San Miguel           | 176,7         | Calefacción+ACS | 71,7               | 62,7               | 57,7               | 66,7               |
| Polideportivo                | 250           | Calefacción+ACS | 72,1               | 62,3               | 57,3               | 67,1               |

Tabla nº180. Resumen de condiciones de las subestaciones de intercambio de los clientes.

En la tabla nº180 se recogen las potencias máximas que pueden demandar cada uno de los clientes y las temperaturas de la subestación de intercambio que se tendrá que instalar en las salas técnicas. Como se puede observar, la temperatura de entrada de los primarios no corresponde con los 75°C con los que sale el agua caliente de los evaporadores de las enfriadoras porque se considera que hay unas pérdidas térmicas en las conducciones, lo cual se calcula en un apartado posterior.

En la primera iteración del cálculo estas temperaturas se tienen que estimar para poder calcular los caudales de reparto y seguir con el cálculo. Al final del procedimiento se comprueba que las temperaturas son acordes por lo reflejado en el cálculo térmico de conducciones. En caso contrario se tendría que volver a este paso para realizar otra iteración del cálculo y volver a repetirlo.

El caudal a suministrar a través del circuito primario a cada subestación térmica viene dado por la expresión (García-Carro, F.M. & Solís 2019):

$$Q = (3600 \cdot P) / (\Delta t \cdot C_e)$$

Donde:

Q: caudal a suministrar en kg/h

P: Potencia térmica en kW

$\Delta t$ : Salto térmico en °C

C<sub>e</sub>: Calor específico del agua en kJ·kg·K

En la tabla nº181 se recoge el caudal a suministrar para cumplir la demanda máxima en cada cliente, teniendo en cuenta el salto térmico permitido en cada caso.



| Cálculo de caudales    |           |                    |                        |                    |                                 |               |              |          |
|------------------------|-----------|--------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------|--------------|----------|
| Subestación            | Pot. (kW) | T <sup>a</sup> ida | T <sup>a</sup> retorno | Salto térmico (°C) | Calor espec. del agua (kJ/K*kg) | Caudal (kg/h) | Caudal (l/s) | Porcent. |
| IES Obispo Argüelles A | 393       | 71,8               | 62,6                   | 9,2                | 4,195                           | 36.658,55     | 9,81         | 15,63%   |
| IES Obispo Argüelles B | 192       | 71,9               | 62,5                   | 9,4                | 4,195                           | 17.528,47     | 5,22         | 8,31%    |
| IES Obispo Argüelles C | 149,5     | 71,7               | 62,7                   | 9,0                | 4,195                           | 14.255,07     | 3,45         | 5,50%    |
| Ayuntam.               | 127,2     | 72,0               | 62,4                   | 9,6                | 4,195                           | 11.370,68     | 3,24         | 5,16%    |
| Casa de la Cultura     | 107,2     | 71,8               | 62,5                   | 9,3                | 4,195                           | 9.890,11      | 2,91         | 4,64%    |
| Centro de Salud        | 1.031,2   | 72,6               | 62,0                   | 10,6               | 4,195                           | 83.484,83     | 26,85        | 42,76%   |
| Colegio San Miguel     | 176,7     | 71,7               | 62,7                   | 9,0                | 4,195                           | 16.848,63     | 4,65         | 7,41%    |
| Polideportivo          | 250       | 72,1               | 62,3                   | 9,8                | 4,195                           | 21.891,95     | 6,65         | 10,59%   |
| TOTAL                  |           |                    |                        |                    |                                 |               | 62,79        | 100,00%  |

Tabla nº181. Caudales máximos a suministrar en cada uno de los clientes.

Teniendo en cuenta estos porcentajes, se distribuyen los caudales para cada uno de los clientes de la siguiente manera:

- Escenario 1: el cliente que consume el caudal correspondiente a su potencia máxima es el IES Obispo Argüelles considerando que sus tres edificios (Principal, entrada y gimnasio) consumen el caudal máximo (9,81+5,22+3,45 l/s). El resto de los clientes se reparten el caudal restante proporcionalmente a sus potencias máximas. El caudal restante es el caudal total menos el consumido por el IES, es decir, 31,2 l/s menos los 18,48 l/s, lo que deja un caudal de 12,72 l/s a repartir entre el resto de los clientes.
- Escenario 2: el cliente que consume su potencia máxima es el Ayuntamiento.
- Escenario 3: el cliente que consume su potencia máxima es la Casa de Cultura.
- Escenario 4: el cliente que consume su potencia máxima es el Centro de Salud.
- Escenario 5: el cliente que consume su potencia máxima es el Colegio Público San Miguel.
- Escenario 6: el cliente que consume su potencia máxima es el Polideportivo.

El reparto de caudales en los distintos escenarios se recoge en la tabla nº182:



| Clientes               | Caudal de clientes en cada escenario de demanda (l/s) |       |       |       |       |       |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| IES Obispo Argüelles A | 9,81  | 4,61  | 4,64  | 1,19  | 4,48  | 4,29  |
| IES Obispo Argüelles B | 5,22  | 2,45  | 2,47  | 0,63  | 2,38  | 2,28  |
| IES Obispo Argüelles C | 3,45  | 1,62  | 1,63  | 0,42  | 1,58  | 1,51  |
| Ayuntamiento           | 0,93  | 3,24  | 1,53  | 0,39  | 1,48  | 1,42  |
| Casa de la Cultura     | 0,84  | 1,37  | 2,91  | 0,35  | 1,33  | 1,27  |
| Centro de Salud        | 7,70  | 12,60 | 12,68 | 26,85 | 12,26 | 11,74 |
| Colegio San Miguel     | 1,33  | 2,18  | 2,20  | 0,56  | 4,65  | 2,03  |
| Polideportivo          | 1,91  | 3,12  | 3,14  | 0,81  | 3,04  | 6,65  |
| Suma                   | 31,20   | 31,20 | 31,20 | 31,20 | 31,20 | 31,20 |

Tabla nº182. Reparto de caudales en cada uno de los escenarios.

Se resalta en naranja el caudal máximo correspondiente en cada escenario y en verde la suma del reparto de los caudales para demostrar que en todos los casos el caudal total es 31,20 l/s.

### Pérdida de carga de las subestaciones

Es necesario meter en el modelo la pérdida de carga de cada una de las subestaciones a disponer en las salas técnicas de los clientes.

Las subestaciones estarán formadas por intercambiadores de calor de placas que transmitirán la energía térmica del agua del circuito de distribución al circuito de calefacción del edificio.

Cada una de estas subestaciones ha sido dimensionada y calculada utilizando el software HTRI Xchanger Suite 7 -HON y su desarrollo se pueden encontrar en el capítulo de salas técnicas. No obstante, se muestra en la tabla nº183 el resumen del cálculo de la pérdida de carga para todas las subestaciones de los clientes:



| <b>Subestaciones</b>   |                      |                         |                             |                               |
|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <b>Subestaciones</b>   | <b>Potencia (kW)</b> | <b>T<sup>a</sup>ida</b> | <b>T<sup>a</sup>retorno</b> | <b>Pérdida de carga (kPa)</b> |
| IES Obispo Argüelles A | 393                  | 71,8                    | 62,6                        | 35,96                         |
| IES Obispo Argüelles B | 192                  | 71,9                    | 62,5                        | 47,65                         |
| IES Obispo Argüelles C | 149,5                | 71,7                    | 62,7                        | 41,93                         |
| Ayuntamiento           | 127,2                | 72,0                    | 62,4                        | 48,86                         |
| Casa de la Cultura     | 107,18               | 71,8                    | 62,5                        | 48,11                         |
| Centro de Salud        | 1031,2               | 72,6                    | 62,0                        | 48,42                         |
| Colegio San Miguel     | 176,7                | 71,7                    | 62,7                        | 49,30                         |
| Polideportivo          | 250                  | 72,1                    | 62,3                        | 48,75                         |

Tabla nº183. Pérdida de carga de las subestaciones.

#### **7.5.2.4. Resultados**

En este apartado se presentan los resultados hidráulicos de la red. Los informes de cálculo completo se presentan en un anexo más adelante, pero a continuación se recogen los resultados más importantes en cada uno de los escenarios calculados.

#### **Bombas**

Las bombas del circuito de distribución se han dimensionado para garantizar el caudal demandado por cada uno de los clientes en todos los escenarios previstos. La impulsión debe permitir, a su vez, que el agua pueda volver a la sala de generación a través de la tubería de retorno. Se ha impuesto que haya una presión en la aspiración de las bombas del entorno de los 5,00 metros columna de agua (m.c.a.) para asegurar que las bombas tienen suficiente potencia para impulsar el agua de retorno.

Se ha impuesto que haya al menos una holgura de presión de 2,00 m.c.a. antes de la válvula de regulación situada en los ramales de clientes más desfavorable. De esta manera se garantiza que en el ramal de cliente más desfavorable haya el caudal demandado. Si se garantiza esto para el cliente que se encuentre en la situación de presión más desfavorable, se garantiza también la demanda en el resto de los clientes.

Teniendo en cuenta los criterios antes mencionados, se ha obtenido una altura de cálculo para cada uno de los escenarios planteados.

La altura de diseño de las bombas hidráulicas de distribución es la máxima altura de impulsión calculada en todos los escenarios, es decir, 53,79 m.c.a. correspondiente al escenario 1



(caudal máximo en el IES Obispo Argüelles), y multiplicada por un coeficiente de sobredimensionamiento de 1,2.

La configuración de las bombas será 2+1 instalando tres bombas en paralelo de manera que trabajen siempre 2 bombas en paralelo y teniendo una de reserva.

Con el caudal de diseño (15,60 l/s) y la altura de diseño (64,55 m.c.a.) se obtiene la potencia de las bombas mediante la siguiente expresión (White 2008):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

Siendo:

$P$  : Potencia de la bomba (W)

$\rho$  : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$Q$  : Caudal de impulsión (m<sup>3</sup>/s)

$h$  : Altura dinámica de la bomba (m)

El producto de la densidad de un fluido por la aceleración de la gravedad es el peso específico del mencionado fluido (N/m<sup>3</sup>).

En la tabla nº184 se puede ver el resumen de resultados del dimensionamiento de las bombas del circuito de distribución, para cada uno de los escenarios, y sus parámetros de diseño.

| Bombas                                    |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Parámetro                                 | E1    | E2    | E3    | E4    | E5    | E6    |
| Configuración                             | 2+1   | 2+1   | 2+1   | 2+1   | 2+1   | 2+1   |
| Caudal cálculo (l/s)                      | 15,60 | 15,60 | 15,60 | 15,60 | 15,60 | 15,60 |
| Altura cálculo (m)                        | 53,79 | 46,89 | 47,06 | 46,41 | 47,12 | 48,13 |
| Caudal de diseño (l/s)                    | 15,60 |       |       |       |       |       |
| Altura diseño (l/s)                       | 64,55 |       |       |       |       |       |
| Peso específico agua (kN/m <sup>3</sup> ) | 10,00 |       |       |       |       |       |
| Potencia (kW)                             | 10,07 |       |       |       |       |       |

Tabla nº184. Resumen de dimensionamiento de las bombas de distribución.

### Resultados en los nudos de la red

Para dimensionar el sistema de bombeo se han tenido muy en cuenta las presiones de los puntos, en concreto la presión máxima del circuito, la presión mínima del circuito y la presión aguas arriba de las válvulas micrométricas de regulación situadas en las salas técnicas.



La presión máxima viene determinada por el material de la tubería a disponer en las conducciones. En esta ocasión se van a disponer tuberías geotérmicas de polipropileno preaisladas de la marca ITALSAN, en concreto, la tubería compuesta RP PP-R RP - Raised Pressure FIBER BLUE SDR9/Serie 4. Este tipo de tubería tiene las limitaciones de presión según sus años de funcionamiento que se muestran en la tabla nº185:

| <b>Presión máxima admisible en el circuito</b> |                                |                                |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>Años</b>                                    | <b>Presión admisible (bar)</b> | <b>Presión admisible (mca)</b> |
| 1  | 9,50                           | 102,57                         |
| 5  | 9,00                           | 97,17                          |
| 10   | 8,90                           | 96,09                          |
| 25   | 8,60                           | 92,85                          |

Tabla nº185. Presión máxima admisible por el material propuesto para las conducciones.

Por lo tanto, la presión máxima admisible en el circuito son 92,85 metros columna de agua.

La presión mínima del sistema se da en la aspiración de las bombas de distribución, una vez se han acumulado las pérdidas de carga de los circuitos de ida y de retorno de las tuberías y las pérdidas localizadas de todos los accesorios del sistema. Se impone que esta presión no sea menor de 4,98 m.c.a. en ningún escenario.

El otro punto crítico a tener en cuenta es la presión justo antes de las válvulas micrométricas de regulación situadas en las subestaciones de intercambio de las salas técnicas de los clientes. A estas válvulas les llega la restricción desde aguas arriba de la presión de la bomba y desde aguas abajo, es decir, de los retornos, les llega la restricción de mantener una presión mínima en la aspiración de las bombas. En caso de que la presión aguas arriba de la válvula sea menor que la presión aguas abajo, la válvula no será capaz de producir la caída de presión necesaria para hacer pasar el caudal demandado por su ramal. Por lo tanto, se impone que la diferencia de presión a ambos lados de las válvulas micrométricas sea al menos de 2 mca, siendo siempre superior en el lado de aguas arriba de la misma.

En la tabla nº186 se recogen los datos mencionados para cada escenario de cálculo. En los escenarios 1 la válvula micrométrica que tiene menor diferencia de presión se encuentra en la sala técnica del gimnasio del IES Obispo Argüelles (IESB). El punto más desfavorable en el escenario 2 se encuentra en el Ayuntamiento (AY). En el escenario 3, se encuentra en la Casa de la Cultura (CC). En el escenario 4 el punto más restrictivo se encuentra en el Centro de Salud Valle de Laciana (CS), mientras que en los escenarios 5 y 6 los puntos más



restrictivos se encuentran en el Colegio Público San Miguel (CP) y en el polideportivo municipal de Villablino (PD), respectivamente.

| Nudos                                    |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro                                | E1                | E2                | E3                | E4                | E5                | E6                |
| Presión máxima admisible (mca)           | 92,85             |                   |                   |                   |                   |                   |
| Punto más desfavorable                   | IESB              | AY                | CC                | CS                | CP                | PD                |
| Presión en punto más desfavorable (mca)  | 84,41             | 60,95             | 66,99             | 35,67             | 70,08             | 76,68             |
| Holgura de presión (mca)                 | 2,00              | 2,00              | 2,00              | 1,91              | 2,00              | 2,00              |
| Punto con mayor presión                  | IESC              | IESC              | IESC              | IESC              | IESC              | IESC              |
| Presión en punto con mayor presión (mca) | 91,76             | 89,86             | 89,99             | 92,84             | 89,31             | 90,39             |
| Punto con menor presión                  | Aspiración bombas | Aspiración bombas | Aspiración bombas | Aspiración bombas | Aspiración bombas | Aspiración bombas |
| Presión en punto con menor presión (mca) | 4,98              | 4,98              | 4,98              | 4,98              | 4,98              | 4,98              |

Tabla nº186. Resultados de presión en los nudos más desfavorables del circuito.

En la figura nº103 se reflejan las presiones de los nudos de la red en cada escenario:

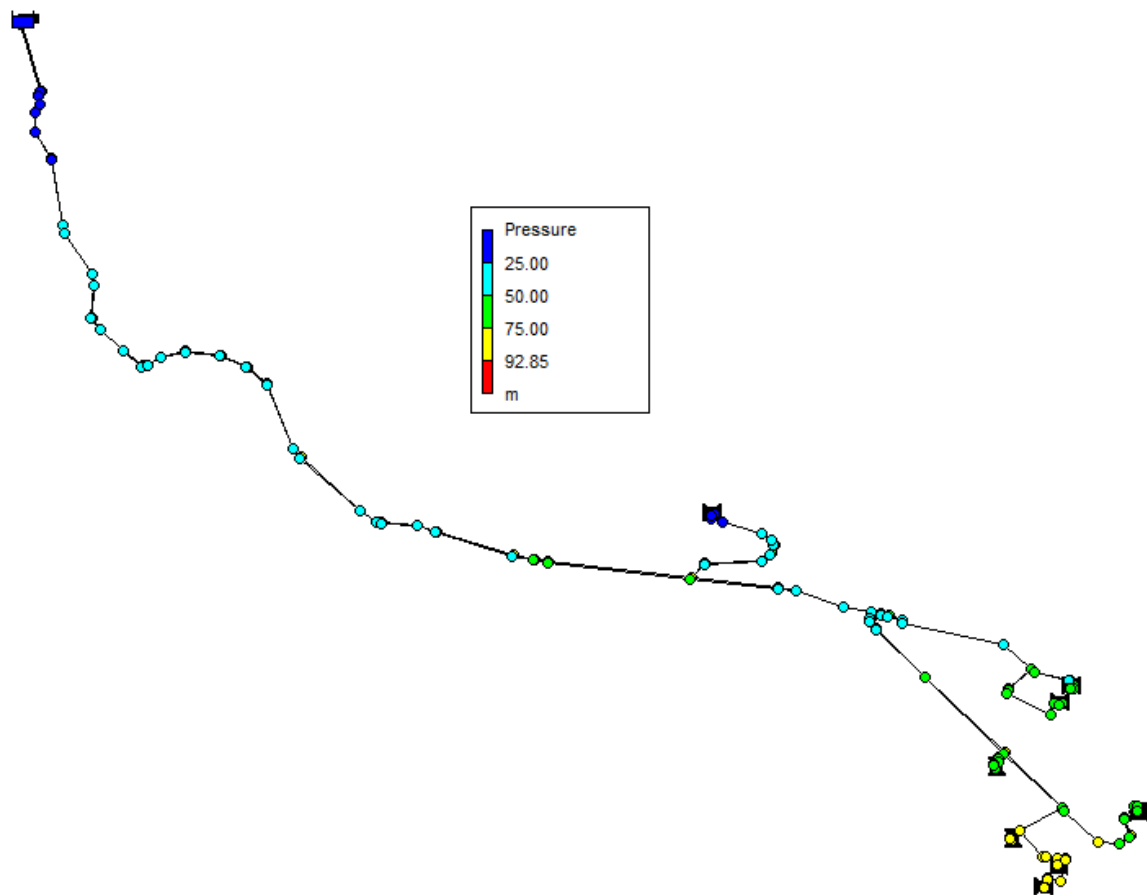


Figura nº103. Presión en los nudos de la red en el escenario 1.

Las presiones mostradas en la figura nº103 corresponden en los nudos de la tubería de retorno. Debido a la proximidad de la tubería de ida y de retorno en el modelo, no se puede ver claramente en la imagen la presión de la tubería de ida, no obstante, todas las presiones se podrán consultar en el anexo de cálculo correspondiente. En la figura nº104 se puede ver un ejemplo:



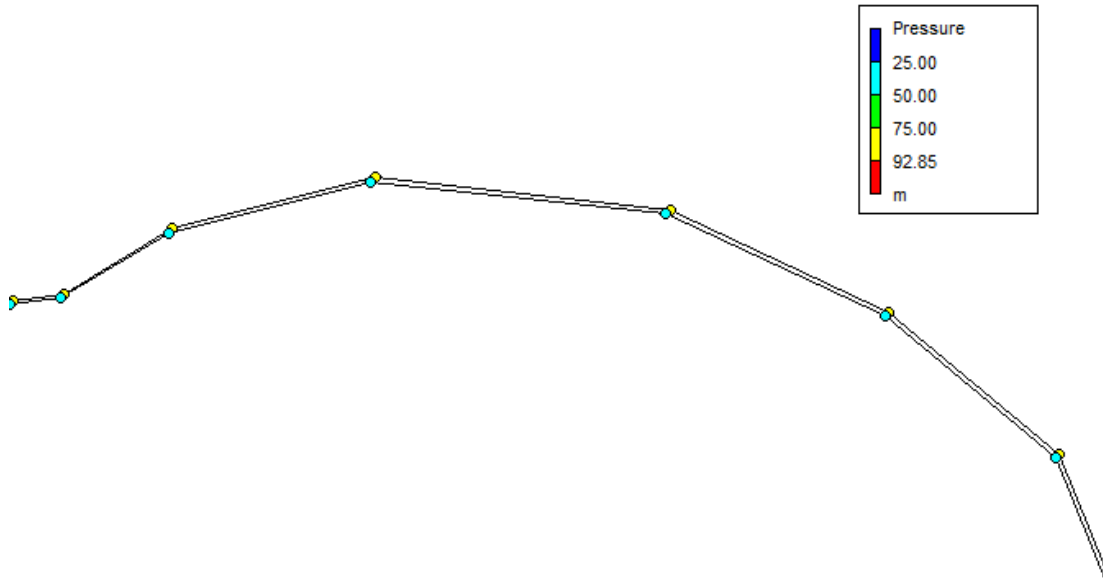


Figura nº104. Diferencia entre las presiones de las tuberías de ida y retorno.

Como se puede comprobar en la figura nº104, la tubería de ida (la que se sitúa por encima) tiene unas presiones superiores a la tubería de retorno (la que se sitúa por debajo). La tubería de ida tiene presiones entre 75 mca y 92,85 mca, y por ello, sus nudos aparecen en amarillo, mientras que la tubería de retorno tiene presiones entre 25 mca y 50 mca.

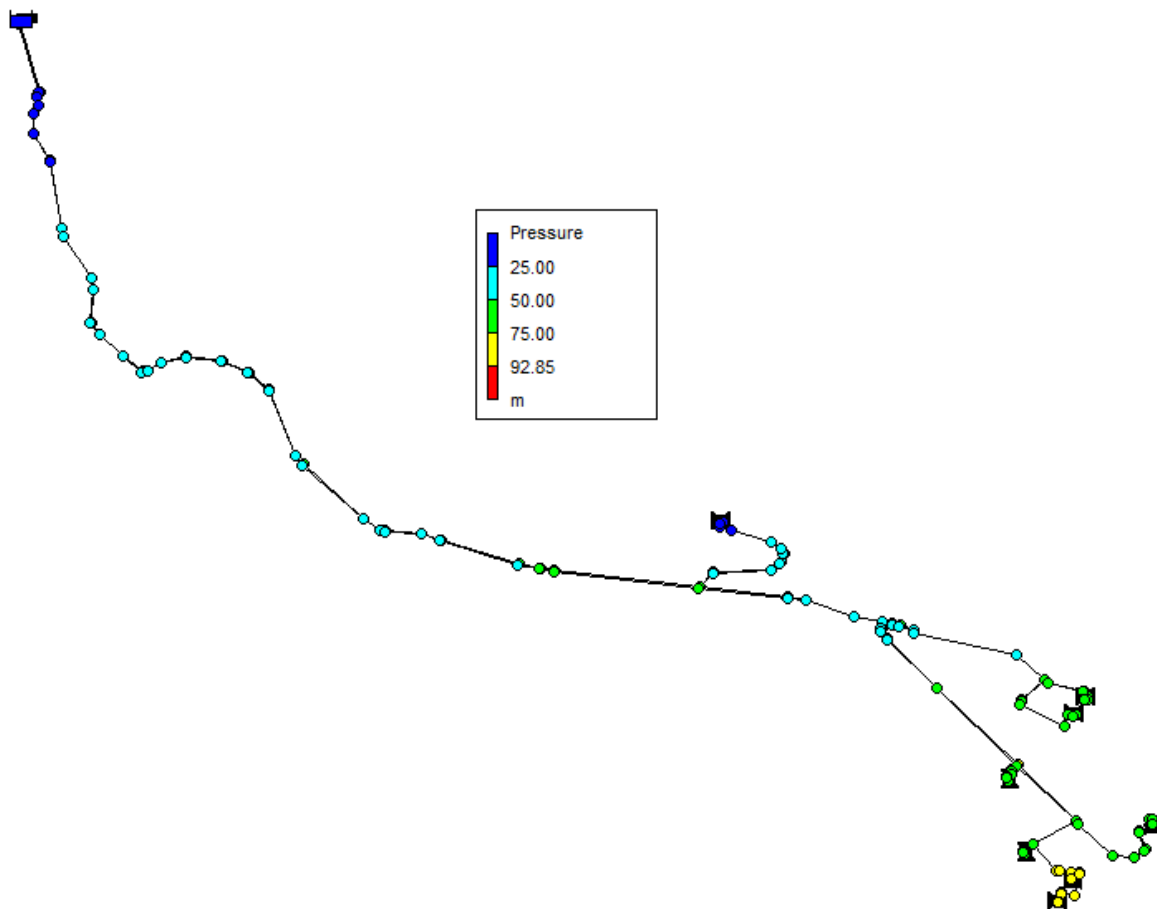


Figura nº105. Presión en los nudos de la red en el escenario 2.

Como se puede observar en la figura nº105, donde se muestra la presión en nudos del escenario 2, las presiones en los nudos de un escenario a otro varían poco (del 1 al 2 únicamente ha cambiado de rango la zona del IESB).

### Resultados en conducciones

Se recogen en este apartado los resultados de todos los tramos de conducciones existentes en la red de calor, en concreto, diámetros, caudales y velocidades. Los distintos tramos han sido codificados según la nomenclatura que se muestra en la tabla nº187:



| Designación | Nudo   |
|-------------|--|
| SG          | Sala de Generación   |
| ICS         | Intersección ramal Centro de Salud                                   |
| CS          | Centro de Salud Valle de Laciana                                     |
| BF1         | Bifurcación 1: hacia Ayuntamiento y hacia Colegio Público San Miguel |
| ICC         | Intersección ramal Casa de la Cultura                                |
| CC          | Casa de la Cultura de Villablino                                     |
| AY          | Ayuntamiento de Villablino   |
| IPD         | Intersección ramal Polideportivo                                     |
| PD          | Polideportivo de Villablino  |
| ICP         | Intersección ramal Colegio Público                                   |
| CP          | Colegio Público San Miguel   |
| IIESB       | Intersección ramal Edificio entrada IES                              |
| IESB        | Edificio entrada IES Obispo Argüelles                                |
| IIESA       | Intersección ramal Edificio principal IES                            |
| IESA        | Edificio principal IES Obispo Argüelles                              |
| IESC        | Gimnasio IES Obispo Argüelles  |

Tabla nº187. Codificación de los tramos de la red.

Los diámetros de la red de tuberías varían entre DN250 y DN90 pudiéndose consultar en la figura nº106 y en la tabla nº189. Los diámetros de la red no cambian de un escenario a otro. Es necesario recalcar que los diámetros de las tuberías de ida y de retorno son iguales para los mismos tramos ya que van a transportar el mismo caudal y por la simplificación en la ejecución de la obra se considera adecuado.

En la tabla nº188 se recogen una serie de datos, al respecto de los diámetros de las tuberías RP PP-R RP - Raised Pressure FIBER BLUE SDR9/Serie 4:

| DN (mm) | DI (mm) | e(mm) |
|---------|---------|-------|
| 63      | 48,80   | 7,10  |
| 75      | 58,20   | 8,40  |
| 90      | 69,80   | 10,10 |
| 110     | 85,40   | 12,30 |
| 125     | 97,00   | 14,00 |
| 160     | 124,20  | 17,90 |
| 200     | 155,20  | 22,40 |
| 250     | 194,20  | 27,90 |

Tabla nº188. Diámetros nominales, interiores y espesor de las tuberías consideradas en el cálculo.

En la figura nº106 se pueden ver los diámetros interiores de los tramos de las conducciones:

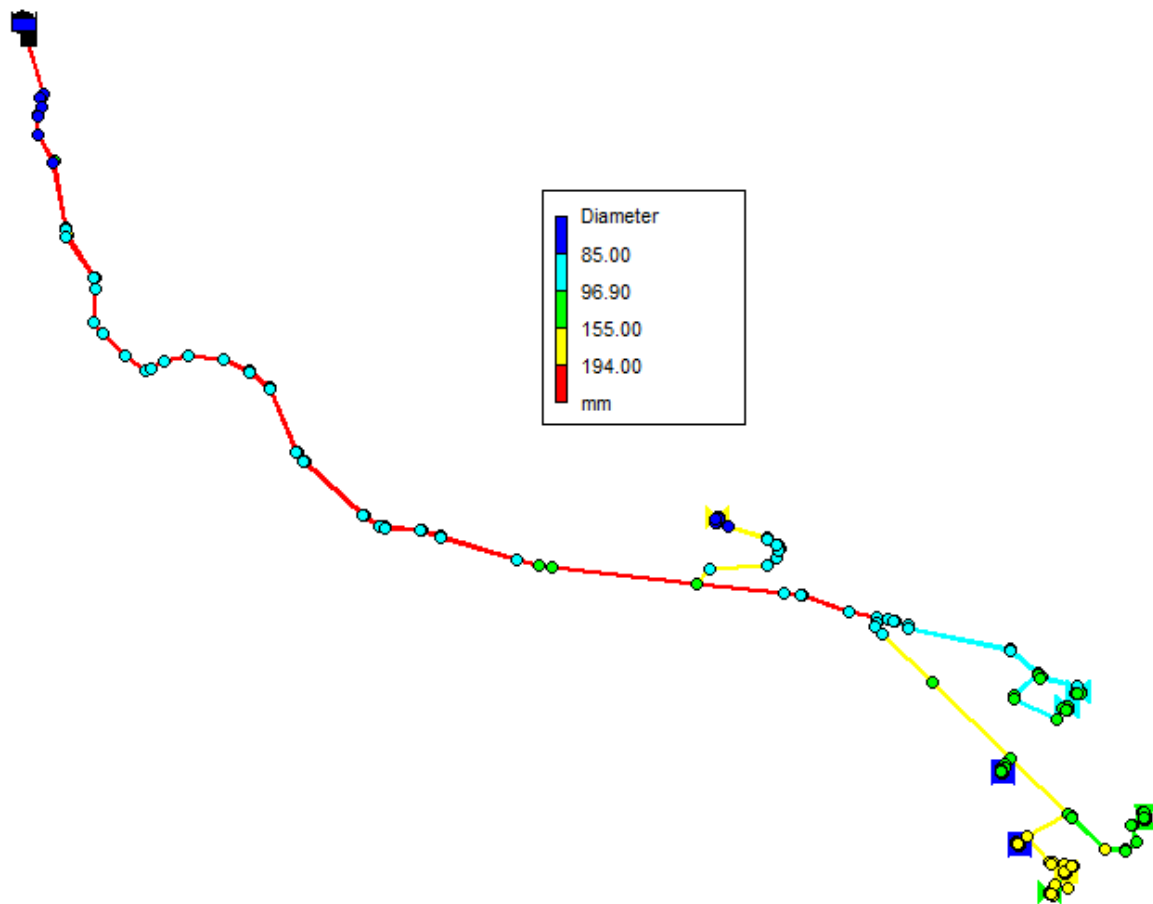


Figura nº106, Diámetros de las conducciones de la red de calor de Villablino.

Los caudales de los tramos cumplen con las demandas impuestas por los clientes en todos los escenarios, como se puede comprobar en la tabla nº189.



| Conducciones por ramales |        |       |               |              |       |       |       |       |       |
|--------------------------|--------|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ramal                    | Inicio | Fin   | Diámetro (mm) | Caudal (l/s) |       |       |       |       |       |
|                          |        |       |               | E1           | E2    | E3    | E4    | E5    | E6    |
| 1                        | SG     | ICS   | DN250         | 31,20        | 31,20 | 31,20 | 31,20 | 31,20 | 31,20 |
| 2                        | ICS    | CS    | DN200         | 7,70         | 12,60 | 12,68 | 26,85 | 12,26 | 11,74 |
| 3                        | ICS    | BF1   | DN250         | 23,49        | 18,59 | 18,52 | 4,35  | 18,94 | 19,45 |
| 4                        | BF1    | ICC   | DN110         | 1,77         | 4,61  | 4,44  | 0,74  | 2,81  | 2,69  |
| 5                        | ICC    | AY    | DN110         | 0,93         | 3,24  | 1,53  | 0,39  | 1,48  | 1,42  |
| 6                        | ICC    | CC    | DN110         | 0,84         | 1,37  | 2,91  | 0,35  | 1,33  | 1,27  |
| 7                        | BF1    | IPD   | DN200         | 21,72        | 13,98 | 14,08 | 3,61  | 16,13 | 16,76 |
| 8                        | IPD    | PD    | DN90          | 1,91         | 3,12  | 3,14  | 0,81  | 3,04  | 6,65  |
| 9                        | IPD    | ICP   | DN200         | 19,81        | 10,86 | 10,94 | 2,80  | 13,09 | 10,11 |
| 10                       | ICP    | CP    | DN125         | 1,33         | 2,18  | 2,20  | 0,56  | 4,65  | 2,03  |
| 11                       | ICP    | IIESB | DN200         | 18,48        | 8,68  | 8,74  | 2,24  | 8,44  | 8,08  |
| 12                       | IIESB  | IESB  | DN90          | 5,22         | 2,45  | 2,47  | 0,63  | 2,38  | 2,28  |
| 13                       | IIESB  | IIESA | DN200         | 13,26        | 6,23  | 6,27  | 1,61  | 6,06  | 5,80  |
| 14                       | IIESA  | IESA  | DN200         | 9,81         | 4,61  | 4,64  | 1,19  | 4,48  | 4,29  |
| 15                       | IIESA  | IESC  | DN125         | 3,45         | 1,62  | 1,63  | 0,42  | 1,58  | 1,51  |

Tabla nº189. Caudales y diámetro de los tramos de la red en los diversos escenarios.

Como criterio de diseño se ha adoptado que la velocidad mínima de los distintos ramales en su escenario de demanda máxima no sea inferior a 0,50 m/s, si bien, se ha permitido que esta velocidad sea menor en escenarios en los que su demanda no sea la máxima. No obstante, este criterio ha sido difícil de cumplir en algunos casos ya que para aumentar la velocidad es necesario disminuir el diámetro de los ramales, lo que aumenta la pérdida de carga y hace que la presión en las válvulas micrométricas no sea suficiente (caso de la Casa de Cultura o el Ayuntamiento).

En la tabla nº190 se presentan las velocidades en todos los tramos según escenarios y se resaltan en amarillo las velocidades de los ramales de los clientes en cuya demanda es máxima según escenarios y que se ha intentado que sea mayor a 0,50 m/s (Kayode 2007; Martínez 2000).



| Conducciones por ramales |        |       |               |                 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|--------|-------|---------------|-----------------|------|------|------|------|------|
| Ramal                    | Inicio | Fin   | Diámetro (mm) | Velocidad (m/s) |      |      |      |      |      |
|                          |        |       |               | E1              | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   |
| 1                        | SG     | ICS   | DN250         | 1,05            | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| 2                        | ICS    | CS    | DN200         | 0,41            | 0,67 | 0,67 | 1,42 | 0,65 | 0,62 |
| 3                        | ICS    | BF1   | DN250         | 0,79            | 0,63 | 0,63 | 0,15 | 0,64 | 0,66 |
| 4                        | BF1    | ICC   | DN110         | 0,31            | 0,80 | 0,78 | 0,13 | 0,49 | 0,47 |
| 5                        | ICC    | AY    | DN110         | 0,16            | 0,57 | 0,27 | 0,07 | 0,26 | 0,25 |
| 6                        | ICC    | CC    | DN110         | 0,15            | 0,24 | 0,51 | 0,06 | 0,23 | 0,22 |
| 7                        | BF1    | IPD   | DN200         | 1,15            | 0,74 | 0,74 | 0,19 | 0,85 | 0,89 |
| 8                        | IPD    | PD    | DN90          | 0,50            | 0,82 | 0,82 | 0,21 | 0,79 | 1,74 |
| 9                        | IPD    | ICP   | DN200         | 1,05            | 0,57 | 0,58 | 0,15 | 0,69 | 0,53 |
| 10                       | ICP    | CP    | DN125         | 0,18            | 0,29 | 0,30 | 0,08 | 0,63 | 0,27 |
| 11                       | ICP    | IIESB | DN200         | 0,98            | 0,46 | 0,46 | 0,12 | 0,45 | 0,43 |
| 12                       | IIESB  | IESB  | DN90          | 1,36            | 0,64 | 0,65 | 0,16 | 0,62 | 0,60 |
| 13                       | IIESB  | IIESA | DN200         | 0,70            | 0,33 | 0,33 | 0,09 | 0,32 | 0,31 |
| 14                       | IIESA  | IESA  | DN200         | 0,52            | 0,24 | 0,25 | 0,06 | 0,24 | 0,23 |
| 15                       | IIESA  | IESC  | DN125         | 0,47            | 0,22 | 0,22 | 0,06 | 0,21 | 0,20 |

Tabla nº190. Velocidades por tramos de la red de calor y según escenarios.

#### 7.5.2.5. *Discusión de los resultados*

El principal factor tenido en cuenta en el diseño hidráulico de las conducciones ha sido la garantía de suministro. Esto se ha conseguido garantizando una presión mínima en el retorno y que los caudales de suministro a los distintos clientes sean los máximos demandados en los diversos escenarios, para encontrar el punto óptimo de equilibrio técnico-económico.

Para cumplir estos requisitos se ha necesitado aumentar el diámetro de las conducciones, lo que penaliza gravemente el aspecto económico de la solución. De esta manera, se han buscado los diámetros mínimos que satisfacen todos los criterios hidráulicos. Se han ejecutado un total de 23 simulaciones, sumando todos los escenarios, para encontrar estos diámetros mínimos.

En la tabla nº191 se muestra el ahorro conseguido por la búsqueda del diámetro mínimo desde la primera simulación que cumplía los parámetros hidráulicos hasta la revisión final.



| Ahorro en conducciones |              |                      |                        |                  |                   |
|------------------------|--------------|----------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| DN (mm)                | Precio (€/m) | Diferencia diámetros | Diferencia precios (€) | Metros ahorrados | Ahorro (€)        |
| 90                     | 38,77        | DN200-DN125          | 136,05                 | 884,87           | 120.386,26        |
| 110                    | 53,32        | DN200-DN110          | 150,27                 | 1.562,52         | 234.799,52        |
| 125                    | 67,54        | DN200-DN90           | 164,82                 | 193,46           | 31.885,70         |
| 200                    | 203,59       | TOTAL                |                        |                  | <b>387.071,47</b> |

Tabla nº191. Ahorro en conducciones.

La cantidad ahorrada en conducciones asciende a la cantidad de 387.071,47€.

Esta cantidad no es nada despreciable, lo que demuestra el gran beneficio que puede tener para el proyecto cuidar la optimización de la modelización hidráulica.

#### 7.5.2.6. Cálculo térmico de las conducciones

En este apartado se calculan las pérdidas térmicas en el circuito de distribución. Las conducciones geotérmicas se aíslan para minimizar estas pérdidas, sin embargo, no es posible evitar completamente la existencia de las mismas.

Para el cálculo de estas pérdidas se ha empleado un programa desarrollado por ITALSAN, fabricante de la tubería a disponer, llamado ITALTERM.

El objetivo principal de este cálculo es conocer la temperatura con la que llega el agua a cada una de las subestaciones de intercambio situadas en las salas técnicas de los clientes. Se han realizado un total de ocho situaciones de cálculo, una por cada cliente.

Es necesario especificar que no se limita la pérdida de temperatura de las conducciones en el exterior. Dentro de la sala de generación hay una distancia importante y es lógico que las pérdidas térmicas sean considerables, es necesario conocerlas y tenerlas acotadas para poder diseñar un sistema efectivo, pero no hay ninguna normativa que limite estas pérdidas.

No ocurre lo mismo en el interior de los edificios ya que el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) sí que limita las pérdidas térmicas dentro del edificio en un 4%.

#### Introducción de datos

Para que el programa pueda devolver la pérdida térmica de las conducciones es necesario proporcionarle una serie de datos, los cuales se resumen a continuación:

- Temperatura del fluido: el agua sale de las enfriadoras a 75°C.



- Temperatura ambiente: se considera que la temperatura en la cara exterior de la tubería (enterrada aproximadamente a 1 metro de profundidad) es de 15°C a lo largo del año. Puede haber variaciones estacionales, pero al estar enterrada, estas variaciones son mucho menos acusadas que si la tubería estuviera a la intemperie.
- Velocidad del fluido: como se ha visto en el cálculo hidráulico la velocidad varía dependiendo de la demanda horaria de los clientes, por lo tanto, es difícil estimar una velocidad única para hacer los cálculos térmicos. Se toma una velocidad de 1 m/s siguiendo las indicaciones del manual de usuario de ITALTERM.
- Conductividad térmica del aislante: El propio manual de usuario recomienda utilizar un valor de 0,038 W/mK para las tuberías de ITALSAN.
- Potencia total de la instalación: Como se ha visto en el cálculo de las enfriadoras, la potencia total del sistema elegido es de 1.922 kW.
- Tipo de tubo: se ha utilizado el tubo Niron Blue SDR9.
- Diámetro de las conducciones en mm.
- Espesor del aislamiento en mm.
- Longitud de las conducciones: se han discretizado los diversos recorridos que tiene el agua desde la sala de generación hasta los distintos clientes por su diámetro, ya que cada diámetro tiene distinto espesor de aislamiento.

En la tabla nº192 se pueden ver las características de las tuberías utilizadas en el cálculo:

| <b>DN (mm)</b> | <b>DI (mm)</b> | <b>E (mm)</b> | <b>Espesor aislamiento (mm)</b> |
|----------------|----------------|---------------|---------------------------------|
| 90             | 69,80          | 10,10         | 32,00                           |
| 110            | 85,40          | 12,30         | 41,80                           |
| 125            | 97,00          | 14,00         | 46,60                           |
| 200            | 155,20         | 22,40         | 53,40                           |
| 250            | 194,20         | 27,90         | 70,20                           |

Tabla nº192. Parámetros de las tuberías de la red de calor de Villablino en escenario inicial.

En la tabla nº193 se pueden ver las longitudes de las tuberías utilizadas en el cálculo para cada cliente y discretizadas por diámetro.





| Longitudes de las conducciones desde la sala de generación hasta los clientes (m) |          |        |        |        |       |          |
|---|----------|--------|--------|--------|-------|----------|
| Cliente   | DN250    | DN200  | DN125  | DN110  | DN90  | Total    |
| IES Obispo Argüelles A  | 2.817,48 | 899,15 | 0,00   | 0,00   | 0,00  | 3.716,62 |
| IES Obispo Argüelles B  | 2.817,48 | 754,30 | 0,00   | 0,00   | 47,90 | 3.571,78 |
| IES Obispo Argüelles C  | 2.817,48 | 868,07 | 146,26 | 0,00   | 0,00  | 3.831,81 |
| Ayuntamiento  | 2.817,48 | 0,00   | 0,00   | 541,86 | 0,00  | 3.359,34 |
| Casa de la Cultura  | 2.817,48 | 0,00   | 0,00   | 655,49 | 0,00  | 3.472,97 |
| Centro de Salud   | 2.389,91 | 417,69 | 0,00   | 0,00   | 0,00  | 2.807,59 |
| Colegio San Miguel  | 2.817,48 | 644,91 | 307,07 | 0,00   | 0,00  | 3.769,46 |
| Polideportivo   | 2.817,48 | 460,11 | 0,00   | 0,00   | 59,73 | 3.277,58 |

Tabla nº193. Longitudes de las conducciones desde la sala de generación hasta los clientes.

### Resultados

En este apartado se recogen los resultados arrojados por el programa.

| Cliente                | Pérdidas térmicas (w/h) | Pérdidas totales (%) | Pérdidas térmicas sin aislamiento (w/h) | Pérdidas totales sin aislamiento (%) |
|------------------------|-------------------------|----------------------|---|--------------------------------------|
| IES Obispo Argüelles A | 127,285.75              | 6,62                 | 735,393.05                              | 38,26                                |
| IES Obispo Argüelles B | 123,558.77              | 6,43                 | 714,723.58                              | 37,18                                |
| IES Obispo Argüelles C | 130,184.27              | 6,77                 | 751,893.97                              | 39,12                                |
| Ayuntamiento           | 110,481.52              | 5,75                 | 646,296.57                              | 33,62                                |
| Casa de la Cultura     | 113,507.64              | 5,91                 | 662,600.29                              | 34,47                                |
| Centro de Salud        | 95,984.45               | 4,99                 | 559,774.11                              | 29,12                                |
| Colegio San Miguel     | 126,806.08              | 6,60                 | 734,968.47                              | 38,24                                |
| Polideportivo          | 113,661.45              | 5,91                 | 661,668.06                              | 34,42                                |

Tabla nº194. Comparación de las pérdidas térmicas con aislamiento y sin aislamiento en la primera situación.

Como se puede observar en la tabla nº194 las pérdidas térmicas con aislamiento son muy inferiores a las que habría en caso de no existir dicho aislamiento. Se pasa del entorno del 5-6% a tener entre un 30 y un 40% de pérdidas.

Este cálculo sirve para definir la temperatura de entrada en las subestaciones de cada cliente, las cuales son recogidas en la tabla nº195.



| Cliente                | T <sup>a</sup> fluido (°C) | Pérdidas totales (%) | T <sup>a</sup> Subestación | T <sup>a</sup> Cálculo subestación |
|------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| IES Obispo Argüelles A | 75,00                      | 6,62                 | 70,04                      | 70,00                              |
| IES Obispo Argüelles B | 75,00                      | 6,43                 | 70,18                      | 70,00                              |
| IES Obispo Argüelles C | 75,00                      | 6,77                 | 69,92                      | 70,00                              |
| Ayuntamiento           | 75,00                      | 5,75                 | 70,69                      | 70,50                              |
| Casa de la Cultura     | 75,00                      | 5,91                 | 70,57                      | 70,50                              |
| Centro de Salud        | 75,00                      | 4,99                 | 71,26                      | 71,00                              |
| Colegio San Miguel     | 75,00                      | 6,60                 | 70,05                      | 70,00                              |
| Polideportivo          | 75,00                      | 5,91                 | 70,57                      | 70,50                              |

Tabla nº195. Definición de temperatura en primarios de las subestaciones de intercambio.

Como se puede observar en la tabla nº195 se da una pérdida térmica aproximadamente de 5°C entre sala de generación y clientes. Se debe tener en cuenta que esta pérdida térmica se da tanto en la ida como en el retorno.

El régimen térmico de las enfriadoras es 75°C y 60°C de retorno. Si se pierden 5°C en la ida y otros 5°C en el retorno implica que las subestaciones tendrán una entrada en el primario de 70°C y una salida en el primario de 65°C, pudiendo aprovechar sólo un salto térmico de 5°C en las subestaciones. Este salto térmico se considera muy bajo, por ello se decide mejorar el aislamiento de las conducciones. En la tabla nº196 se especifica el espesor adicional tenido en cuenta para mejorar las pérdidas de calor en la red.

| DN (mm) | DI (mm) | e (mm) | Espesor aislamiento comercial (mm) | Espesor adicional (mm) | Espesor aislamiento total (mm) |
|---------|---------|--------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 90      | 69,80   | 10,10  | 32,00                              | 0,00                   | 32,00                          |
| 110     | 85,40   | 12,30  | 41,80                              | 0,00                   | 41,80                          |
| 125     | 97,00   | 14,00  | 46,60                              | 0,00                   | 46,60                          |
| 200     | 155,20  | 22,40  | 53,40                              | 70,20                  | 123,60                         |
| 250     | 194,20  | 27,90  | 70,20                              | 62,13                  | 132,33                         |

Tabla nº196. Parámetros de las tuberías de la red de calor de Villablino en escenario definitivo.

Estos nuevos valores de aislamiento arrojan los resultados de pérdidas térmicas mostrados en la tabla nº197:



| Cliente                | Pérdidas térm. (w/h) | Pérdidas totales (%) | Pérdidas térm. sin aisl (w/h) | Pérdidas totales sin aisl (%) |
|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| IES Obispo Argüelles A | 74,693.69            | 4,27                 | 661,668.06                    | 38.26                         |
| IES Obispo Argüelles B | 85,187.45            | 4,18                 | 734,968.47                    | 37.18                         |
| IES Obispo Argüelles C | 62,537.18            | 4,44                 | 559,774.11                    | 39.12                         |
| Ayuntamiento           | 78,113.83            | 4,06                 | 646,296.57                    | 33.62                         |
| Casa de la Cultura     | 85,364.51            | 4,22                 | 751,893.97                    | 34.47                         |
| Centro de Salud        | 80,370.98            | 3,25                 | 714,723.58                    | 29.12                         |
| Colegio San Miguel     | 81,139.95            | 4,43                 | 662,600.29                    | 38.24                         |
| Polideportivo          | 82,020.15            | 3,89                 | 735,393.05                    | 34.42                         |

Tabla nº197. Comparación de las pérdidas térmicas con aislamiento y sin aislamiento en la situación definitiva.

Conociendo estas pérdidas térmicas se calculan las temperaturas de entrada y salida en los primarios de las subestaciones. En la tabla nº198 se recogen los resultados de este cálculo.

| Cliente                | Temp.fluido (°C) | Pérdidas totales (%) | Temp. Subestación | Temp. Calculo subestación |
|------------------------|------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|
| IES Obispo Argüelles A | 75,00            | 4,27                 | 71,80             | 71,80                     |
| IES Obispo Argüelles B | 75,00            | 4,18                 | 71,87             | 71,90                     |
| IES Obispo Argüelles C | 75,00            | 4,44                 | 71,67             | 71,70                     |
| Ayuntamiento           | 75,00            | 4,06                 | 71,96             | 72,00                     |
| Casa de la Cultura     | 75,00            | 4,22                 | 71,84             | 71,80                     |
| Centro de Salud        | 75,00            | 3,25                 | 72,56             | 72,60                     |
| Colegio San Miguel     | 75,00            | 4,43                 | 71,68             | 71,70                     |
| Polideportivo          | 75,00            | 3,89                 | 72,08             | 72,10                     |

Tabla nº198. Cálculo de las temperaturas de entrada del agua de la red en el primario de las subestaciones.

En la tabla nº199 se muestra el cálculo de la temperatura del retorno del primario en cada una de las subestaciones, teniendo en cuenta que la temperatura de retorno en la sala de generación deben ser 60°C.



| Cliente                | T <sup>a</sup> fluido (°C) | Pérdidas totales (%) | T <sup>a</sup> Subestación | T <sup>a</sup> cálculo subestación |
|------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| IES Obispo Argüelles A | 60,00                      | 4,27                 | 62,56                      | 62,60                              |
| IES Obispo Argüelles B | 60,00                      | 4,18                 | 62,51                      | 62,50                              |
| IES Obispo Argüelles C | 60,00                      | 4,44                 | 62,66                      | 62,70                              |
| Ayuntamiento           | 60,00                      | 4,06                 | 62,44                      | 62,40                              |
| Casa de la Cultura     | 60,00                      | 4,22                 | 62,53                      | 62,50                              |
| Centro de Salud        | 60,00                      | 3,25                 | 61,95                      | 62,00                              |
| Colegio San Miguel     | 60,00                      | 4,43                 | 62,66                      | 62,70                              |
| Polideportivo          | 60,00                      | 3,89                 | 62,33                      | 62,30                              |

Tabla nº199. Cálculo de las temperaturas de salida del agua de la red del primario de las subestaciones.

Las últimas columnas de las tablas nº198 y 199 corresponden con las temperaturas de los circuitos primarios de las subestaciones de intercambio tenidas en cuenta para hallar los caudales del circuito en apartados anteriores. Se consigue un salto térmico en las subestaciones del entorno de 10°C, por lo tanto, se considera bien dimensionado el aislamiento térmico de las conducciones de distribución. En la tabla nº200 se pueden observar las temperaturas de cálculo de las subestaciones.

| Cliente                | Primario          |                   | Secundario        |                   |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                        | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> |
| IES Obispo Argüelles A | 72,10             | 62,30             | 57,30             | 67,10             |
| IES Obispo Argüelles B | 71,70             | 62,70             | 57,70             | 66,70             |
| IES Obispo Argüelles C | 72,60             | 62,00             | 57,00             | 67,60             |
| Ayuntamiento           | 72,00             | 62,40             | 57,40             | 67,00             |
| Casa de la Cultura     | 71,70             | 62,70             | 57,70             | 66,70             |
| Centro de Salud        | 71,90             | 62,50             | 57,50             | 66,90             |
| Colegio San Miguel     | 71,80             | 62,50             | 57,50             | 66,80             |
| Polideportivo          | 71,80             | 62,60             | 57,60             | 66,80             |

Tabla nº200. Definición de temperaturas en las subestaciones de intercambio.

Se considera que el salto térmico entre la entrada del primario y la salida del secundario en las subestaciones de intercambio es de 5°C para el buen dimensionamiento de los intercambiadores de calor. Este detalle se explica en los cálculos de los mismos en un apartado posterior.



La tabla nº200 tabla se debe comparar con la tabla nº180, utilizada al principio del cálculo para calcular el reparto de caudales. Si las dos tablas son razonablemente parecidas se dará el cálculo por válido, en caso contrario se deberá repetir calculando de nuevo el reparto de caudales con los nuevos valores de temperaturas de las subestaciones.

### **7.5.3. Circuito de condensación**

El circuito de condensación conecta los condensadores de las enfriadoras (dispuestos en serie) con el separador hidráulico del circuito de distribución. Se trata de un circuito cerrado cuyos elementos principales son los siguientes:

- Las bombas de condensación, para las que se ha planteado una disposición 2+1.
- Los condensadores de las enfriadoras.
- El paso por el condensador hidráulico.

El circuito cuenta con una longitud total de 136,82 metros en tuberías de acero al carbono que será preciso calorifugar de 8" de diámetro nominal (DN200).

#### **7.5.3.1. Metodología general**

Se ha modelizado el circuito mediante el programa EPANET 2.0, como en casos anteriores.

La metodología utilizada es similar a la utilizada en el circuito de distribución en cuanto a pérdidas de carga tanto de las conducciones como localizadas.

#### **7.5.3.2. Modelo**

El modelo introducido en el programa se refleja en la figura nº107 y reproduce una geometría ficticia del circuito manteniendo sus longitudes estimadas.

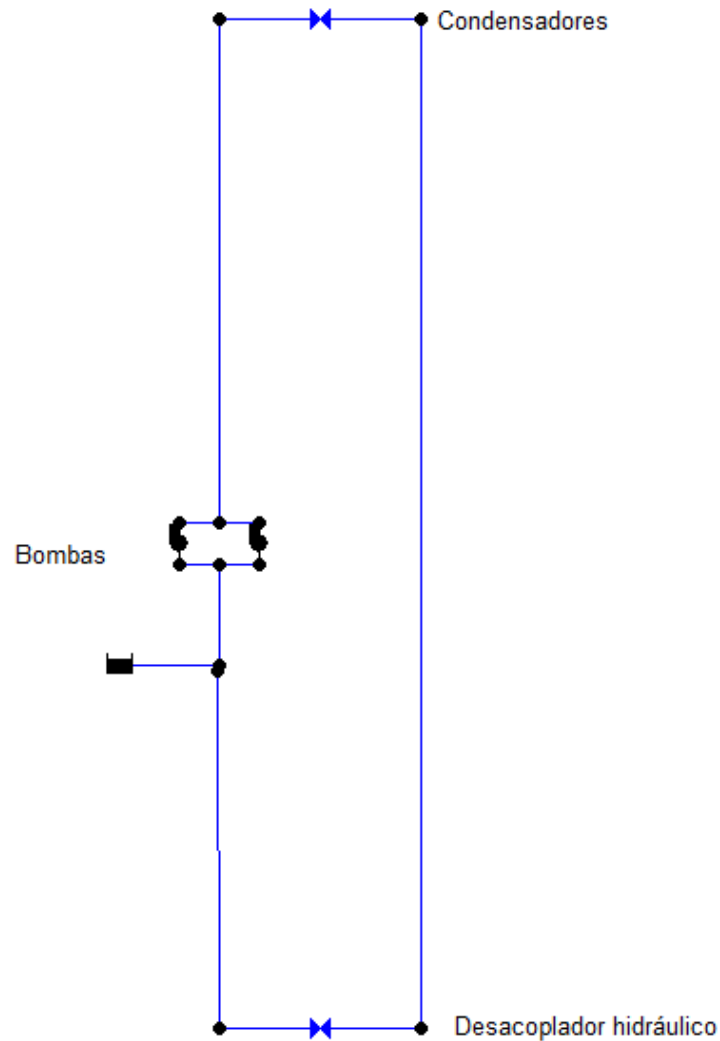


Figura nº107. Geometría del modelo introducido en EPANET.

Se supone un desnivel de 5 metros en el circuito para simular la diferencia de cota que puede haber dentro del circuito. Los condensadores de las enfriadoras se simulan como una válvula que produce una pérdida de carga determinada e igual a 31,6 kPa. El separador hidráulico se simula como una tubería de DN600 debido a que este será el diámetro del mismo, lo cual se demostrará en apartados posteriores cuando se aborde su diseño.

El modelo ha incorporado una válvula por el simple hecho de señalar la posición del separador, pero no produciendo ninguna repercusión en el cálculo.



### **7.5.3.3. Datos de partida**

Los datos de partida que necesita el programa son los mismos que en la modelización del circuito de distribución. En este caso la rugosidad de la tubería es de 0,03 mm debido su material, acero al carbono.

#### **Caudal del circuito**

El caudal del circuito de condensación viene fijado por el dimensionamiento de las enfriadoras y es igual a 31,2 l/s. Al disponer tres bombas en paralelo, pero forzando a que trabajen solo dos, el caudal que circula por cada bomba es de 15,6 l/s.

#### **Pérdida de carga de los elementos del circuito**

La pérdida de carga que experimenta el fluido tras su paso por los condensadores de las enfriadoras, tal y como se refleja en el dimensionamiento de las mismas, es de 31,6 kPa, que si se transforma a metros columna de agua se obtienen 3,16 m.c.a.

### **7.5.3.4. Resultados**

En este apartado se presentan los resultados hidráulicos de la red. Los informes de cálculo completos se presentarán en un anexo más adelante.

#### **Bombas**

Las bombas del circuito de condensación se han dimensionado para garantizar que el caudal demandado llega a todos los puntos del circuito.

Se ha impuesto que haya al menos presión mínima de 2,00 m.c.a. en todos los puntos del circuito lo que implica que las bombas tengan una altura de impulsión de al menos 3,63 m.c.a. Se le aplica un factor de sobredimensionamiento de 1,20, por lo tanto, la altura de diseño es 4,36 m.c.a.

Con el caudal de diseño (15,60 l/s) y la altura de diseño (4,36 m.c.a.) se obtiene la potencia de las bombas tal y como se expresó en la modelización del circuito de distribución. El resumen del dimensionamiento de las bombas del circuito de condensadores se recoge en la tabla nº201.



| Bombas                                    |       |
|---|-------|
| Parámetro                                 | E1    |
| Configuración                             | 2+1   |
| Caudal cálculo (l/s)                      | 15,60 |
| Altura cálculo (m)                        | 3,63  |
| Caudal de diseño (l/s)                    | 15,60 |
| Altura diseño (l/s)                       | 4,36  |
| Peso específico agua (kN/m <sup>3</sup> ) | 10,00 |
| Potencia (kW)                             | 0,68  |

Tabla nº201. Resumen de dimensionamiento de las bombas de condensación.

### Resultados en los nudos de la red

En la figura nº108 se muestran las presiones de los nudos del circuito de condensación:

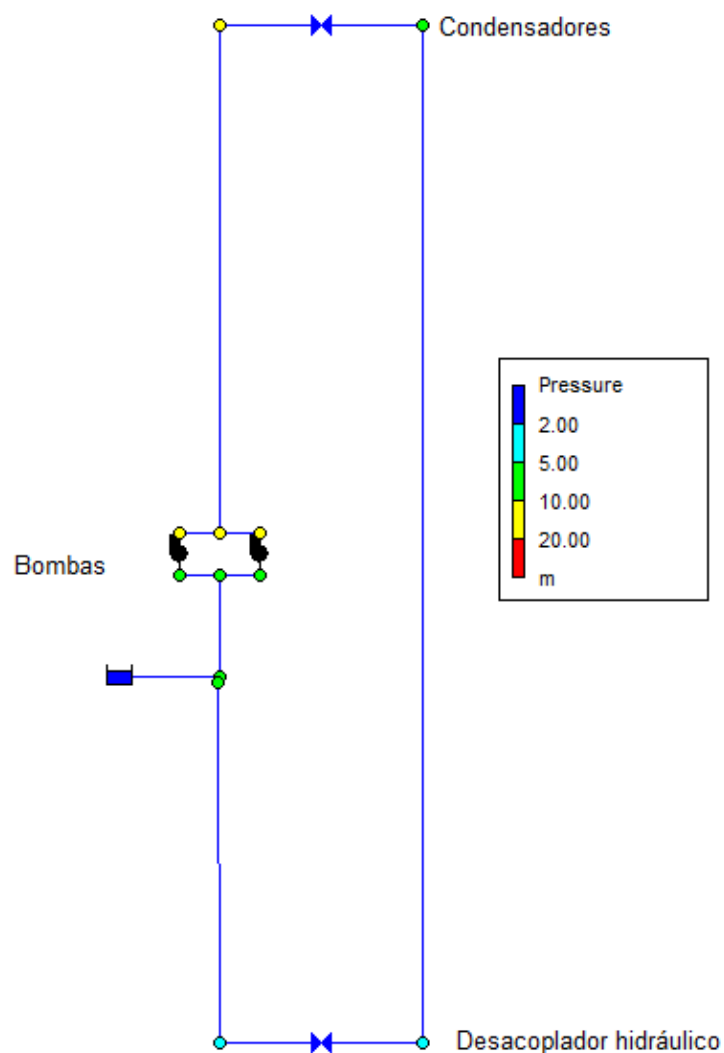


Figura nº108. Presión en los nudos del circuito de condensación.





La presión en la aspiración de las bombas es de 6,95 m.c.a. mientras que la presión en la impulsión es de 10,58 m.c.a., siendo este el punto con mayor presión del circuito.

### Resultados en conducciones

En la tabla nº202 se recogen los resultados las conducciones del circuito de condensación, en concreto, diámetros, caudales y velocidades.

| Conducciones          |              |              |                 |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| Tramo                 | Diámetro (") | Caudal (l/s) | Velocidad (m/s) |
| Circuito condensación | 8"           | 31,20        | 0,90            |
| Separador hidráulico  | 24"          | 31,20        | 0,10            |

Tabla nº202. Resultados de las conducciones del circuito de condensación.

La velocidad en las conducciones del circuito es correcta ya que se encuentra entre 0,5 m/s y 2,5 m/s (Kayode 2007; Martínez 2000). La velocidad de 0,1 m/s en el separador hidráulico es muy adecuada ya que permite la eliminación de burbujas y la decantación de impurezas (Ponce 2012).

#### **7.5.3.5. Cálculo térmico de las conducciones**

El cálculo térmico de las conducciones no se puede llevar a cabo siguiendo la metodología expuesta en el circuito de distribución ya que la tubería no es la misma. En esa ocasión se utilizó un programa comercial especializado en las tuberías de la marca ITALSAN, el cual incluye las propiedades de los productos de la marca. Al utilizar en el circuito de condensación una tubería de acero al carbono normal, no se pueden utilizar las características intrínsecas del programa ITALTERM y, por tanto, es necesario realizar el cálculo de manera teórica.

La transferencia de calor entre cuerpos ha sido estudiada por numerosos autores (Kang, T.K., Peterson, G.P. & Fletcher 1990; Yovanovich 1986; Fried 1969, entre muchos otros). En la configuración que normalmente adopta una tubería aislada existen cinco tipos de resistencias térmicas (Stubblefield, M.A., Pang, S.S. & Cundyt 1996):

- R1: Resistencia convectiva entre el fluido y la pared interior de la tubería.
- R2: Resistencia conductiva a través de la pared de la tubería.
- R3: Resistencia de contacto entre la tubería y el aislamiento.
- R4: Resistencia conductiva a través del aislamiento.
- R5: Resistencia convectiva entre el aislamiento y el aire.



Para simplificar los cálculos se va a realizar las siguientes hipótesis (Stubblefield, M.A., Pang, S.S. & Cundyt 1996):

- La conductividad térmica de los materiales es constante.
- El contacto entre materiales es estático.
- Las resistencias convectivas entre medios y la de contacto son pequeñas y se desprecian (R1, R3 y R5).
- El flujo térmico es estable.

Además, se va a considerar que la resistencia conductiva del material de la tubería, en este caso acero al carbono es muy pequeña y, por lo tanto, también se desprecia (R2). Despreciar las resistencias R1, R2, R3 y R5 añade un coeficiente de seguridad importante al cálculo.

Según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (Ministerio de la Presidencia 2007) se establece que las pérdidas térmicas en las conducciones que discurren por el interior de un edificio deben ser menores al 4%. Al discurrir el circuito de condensación íntegramente por la sala de generación es prescriptivo que cumpla esta indicación del RITE.

### Datos de partida

La formulación utilizada para hallar la transferencia térmica es la siguiente (Incropera, F.P. & DeWitt 1990):

$$Q = \frac{\Delta T}{R1 + R2 + R3 + R4 + R5}$$

Siendo:

$Q$  : Transferencia térmica (W)

$\Delta T$  : Diferencia entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente.

$R1; R2; R3; R4; R5$  : Resistencias anteriormente definidas, de las cuáles solo se considera R4.

La resistencia conductiva a través del aislamiento (R4) se determina mediante la siguiente fórmula (Stubblefield, M.A., Pang, S.S. & Cundyt 1996):

$$R2 = \frac{\log \frac{r2}{r1}}{2\pi kL}$$

Siendo:

$r2$  : Radio exterior del aislamiento.



$r_1$  : Radio interior del aislamiento.

$k$  : Conductividad térmica del aislamiento.

$L$  : Longitud de la conducción.

El aislamiento propuesto es lana de roca aglomerada con ligantes sintéticos, para tuberías de diámetro 8", diámetro interior 219 mm, espesor nominal 40 mm y densidad 100 kg/m<sup>3</sup>. La conductividad térmica de este material es 0,05 W/mK (Ohmura, T., Tsuboi, M. & Tomimura 2002). Teniendo en cuenta que la longitud total del circuito es de 136,82 metros, que la temperatura del fluido son 75°C y la temperatura ambiente a lo largo del año se estima en 5°C, se puede obtener la pérdida térmica en la conducción.

### Resultados

Siguiendo la formulación reflejada en el apartado anterior se obtiene la transferencia térmica del fluido en su paso por el circuito de condensación. Comparando esta transferencia con la potencia térmica de la instalación (1.922 kW) se puede obtener el porcentaje de pérdidas del circuito. En la tabla nº203 se recogen los resultados del cálculo de la pérdida térmica en el circuito de condensación.

| Parámetro                                    | Valor            |
|--|------------------|
| Temperatura fluido (°C)                      | 75,00            |
| Temperatura ambiente (°C)                    | 5,00             |
| Conductividad térmica del aislamiento (W/mK) | 0,05             |
| Longitud (m)                                 | 136,82           |
| Radio exterior aislamiento (m)               | 0,15             |
| Radio interior aislamiento (m)               | 0,11             |
| <b>Transferencia Térmica (W)</b>             | <b>22.250,20</b> |
| Potencia térmica inicial (W)                 | 1.922.000,00     |
| <b>Pérdida térmica</b>                       | <b>1,16%</b>     |

Tabla nº203. Cálculo de la pérdida térmica del circuito de condensación.

Se obtienen unas pérdidas térmicas del 1,16% inferiores al 4% estipulado por el RITE, por lo tanto, el diseño del aislamiento de las conducciones es adecuado.

#### 7.5.4. Circuito de evaporación

El circuito de evaporación conecta el intercambiador de calor de agua de mina con los evaporadores de las enfriadoras (dispuestos en serie). Se trata de un circuito cerrado cuyos elementos principales son los siguientes:



- Las bombas de evaporación, para las que se ha planteado una disposición 2+1.
- El paso por el intercambiador de calor de agua de mina.
- Los evaporadores de las enfriadoras.

El circuito cuenta con una longitud total de 136,82 metros en tuberías de acero al carbono que será preciso calorifugar de 8" de diámetro nominal (DN200).

#### **7.5.4.1. Metodología general**

La modelización del circuito se ha realizado de la misma forma señalada en casos anteriores.

La metodología utilizada es similar a la utilizada en el circuito de distribución en cuanto a pérdidas de carga tanto de las conducciones como localizadas.

#### **7.5.4.2. Modelo**

El modelo introducido en el programa reproduce una geometría ficticia del circuito manteniendo sus longitudes estimadas. La geometría introducida se puede ver en la figura nº109.

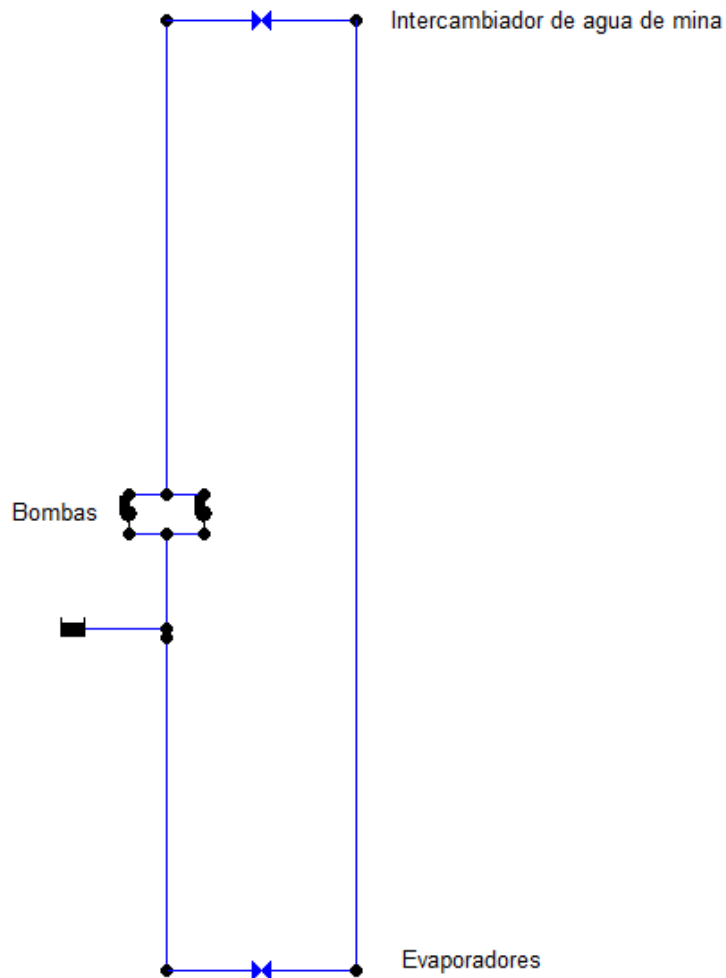


Figura nº109. Geometría del modelo introducido en EPANET.

Se supone un desnivel de 5 metros en el circuito para simular la diferencia de cota que puede haber dentro del circuito. El intercambiador de agua de mina se simula como una válvula que produce una pérdida de carga determinada e igual a la resultante del cálculo del intercambiador. Los evaporadores de las enfriadoras se simulan como una válvula que produce una pérdida de carga determinada e igual a 148 kPa.

#### 7.5.4.3. Datos de partida

Los datos de partida que necesita el programa son los mismos que en la modelización del circuito de distribución. En este caso la rugosidad de la tubería es de 0,03 mm que es la que se ha venido asignando en esta memoria al acero al carbono.



### **Caudal del circuito**

El caudal del circuito de evaporador viene fijado por el dimensionamiento de las enfriadoras y es igual a 60,70 l/s. Al disponer tres bombas en paralelo, pero forzando a que trabajen solo dos, el caudal que circula por cada bomba es de 30,35 l/s.

### **Pérdida de carga de los elementos del circuito**

La pérdida de carga que experimenta el fluido tras su paso por los evaporadores de las enfriadoras, tal y como se refleja en el dimensionamiento de las mismas, es de 148 kPa, que si se transforma a metros columna de agua se obtienen 14,8 mca.

La pérdida de carga que experimenta el fluido tras su paso por el intercambiador de calor de agua de mina, tal y como se refleja en el dimensionamiento del mismo, es de 93,8 kPa, que si se transforma a metros columna de agua se obtienen 9,38 mca.

#### **7.5.4.4. Resultados**

En este apartado se presentan los resultados hidráulicos de la red. Los informes de cálculo completos se presentarán en un anexo más adelante.

### **Bombas**

Las bombas del circuito de condensación se han dimensionado para garantizar el caudal demandado llega a todos los puntos del circuito.

Se ha impuesto que haya al menos presión mínima de 2,00 m.c.a. en todos los puntos del circuito lo que implica que las bombas tengan una altura de impulsión de al menos 25,65 m.c.a. Se le aplica un factor de sobredimensionamiento de 1,20, por lo tanto, la altura de diseño es 30,78 m.c.a.

Con el caudal de diseño (15,60 l/s) y la altura de diseño (30,78 m.c.a.) se obtiene la potencia de las bombas, tal y como se expresó en la modelización del circuito de distribución. En la tabla nº204 se muestran los resultados de la modelización de las bombas del circuito de evaporación.



| Bombas                                    |       |
|---|-------|
| Parámetro                                 | E1    |
| Configuración                             | 2+1   |
| Caudal cálculo (l/s)                      | 30,35 |
| Altura cálculo (m)                        | 25,65 |
| Caudal de diseño (l/s)                    | 30,35 |
| Altura diseño (l/s)                       | 30,78 |
| Peso específico agua (kN/m <sup>3</sup> ) | 10,00 |
| Potencia (kW)                             | 9,34  |

Tabla nº204. Resumen de dimensionamiento de las bombas de evaporación.

### Resultados en los nudos de la red

En la figura nº110 se muestran las presiones de los nudos del circuito de condensación:

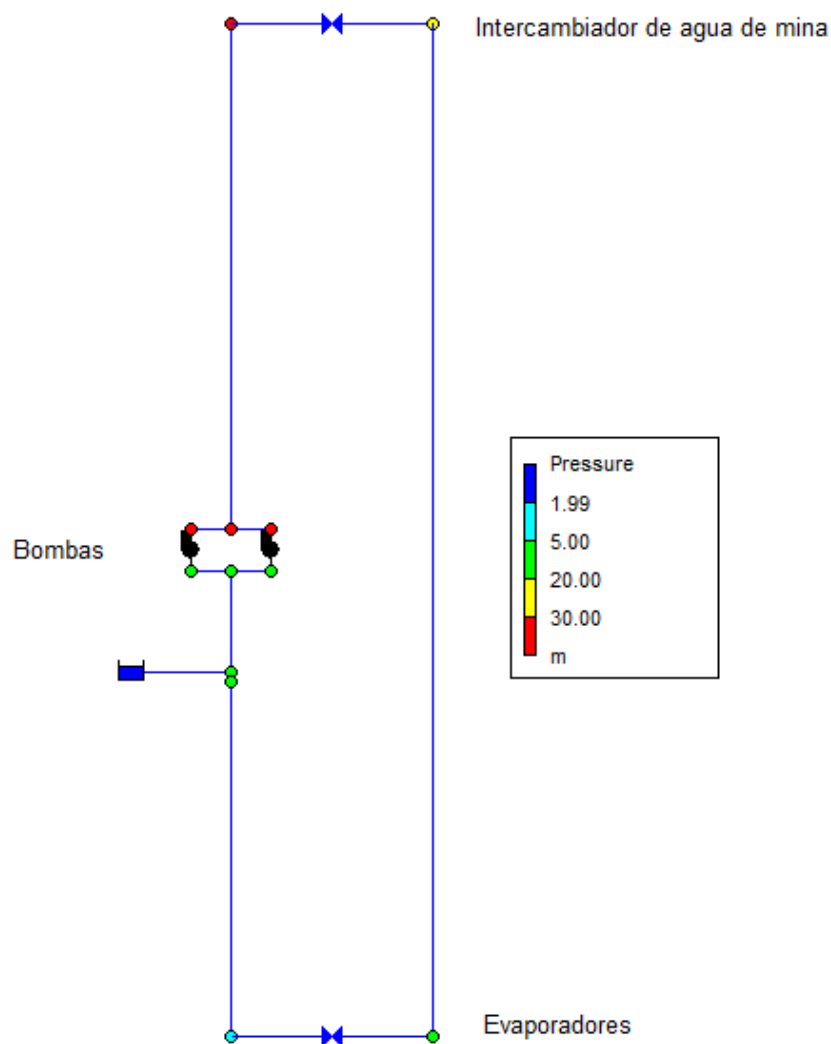


Figura nº110. Presión en los nudos del circuito de condensación.



La presión en la aspiración de las bombas es de 6,67 m.c.a. mientras que la presión en la impulsión es de 32,30 m.c.a., siendo este el punto con mayor presión del circuito.

### Resultados en conducciones

Se recogen en la tabla nº205 los resultados las conducciones del circuito de condensación, en concreto, diámetros, caudales y velocidades.

| <b>Conducciones</b>  |                     |                     |                        |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Tramo</b>         | <b>Diámetro (")</b> | <b>Caudal (l/s)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| Circuito evaporación | 8"                  | 60,70               | 1,75                   |

Tabla nº205. Resultados de las conducciones del circuito de evaporación.

La velocidad en las conducciones del circuito es correcta ya que se encuentra entre 0,5 m/s y 2,5 m/s (Kayode 2007; Martínez 2000).

#### **7.5.4.5. Cálculo térmico de las conducciones**

El cálculo térmico de las conducciones del circuito de evaporación se va a realizar utilizando la misma metodología y formulación empleada en el circuito de condensación.

### Datos de partida

El aislamiento propuesto el mismo que en el circuito de condensación, es decir, lana de roca aglomerada con ligantes sintéticos, para tuberías de diámetro 8", diámetro interior 219 mm, espesor nominal 40 mm y densidad 100 kg/m<sup>3</sup>. La conductividad térmica de este material es 0,05 W/mK (Ohmura, T., Tsuboi, M. & Tomimura 2002). Teniendo en cuenta que la longitud total del circuito es de 136,82 metros, que la temperatura del fluido son 12°C y la temperatura ambiente a lo largo del año se estima en 5°C, se puede obtener la pérdida térmica en la conducción.

### Resultados

Siguiendo la formulación reflejada en el apartado anterior se obtiene la transferencia térmica del fluido en su paso por el circuito de condensación. Comparando esta transferencia con la potencia térmica de la instalación (1.922 kW) se puede obtener el porcentaje de pérdidas del circuito. En la tabla nº206 se recogen los resultados de la pérdida térmica en el circuito de condensación.





| Parámetro                                    | Valor           |
|--|-----------------|
| Temperatura fluido (°C)                      | 12,00           |
| Temperatura ambiente (°C)                    | 5,00            |
| Conductividad térmica del aislamiento (W/mK) | 0,05            |
| Longitud (m)                                 | 136,82          |
| Radio exterior aislamiento (m)               | 0,15            |
| Radio interior aislamiento (m)               | 0,11            |
| <b>Transferencia Térmica (W)</b>             | <b>2.225,02</b> |
| Potencia térmica inicial (W)                 | 1.922.000,00    |
| <b>Pérdida térmica</b>                       | <b>0,12%</b>    |

Tabla nº206. Cálculo de la pérdida térmica del circuito de condensación.

Se obtienen unas pérdidas térmicas del 0,12% inferiores al 4% estipulado por el RITE, por lo tanto, el diseño del aislamiento se considera adecuado.

#### 7.5.5. Circuito de agua de mina

El circuito de agua de mina conecta la balsa de acumulación de agua de mina con el intercambiador de calor de agua de mina y después conduce el agua hasta el canal de drenaje existente. Se trata de un circuito abierto cuyos elementos principales son los siguientes:

- Las bombas de agua de mina, situadas en dentro de la balsa y con una configuración 1+1.
- El paso por el intercambiador de calor de agua de mina.
- La obra de devolución de agua de mina al canal de drenaje.

El circuito cuenta con una longitud total de 44,20 metros en tuberías de acero al carbono que será preciso calorifugar de 8" de diámetro nominal (DN200).

##### 7.5.5.1. Metodología general

La modelización se ha realizado siguiendo la metodología descrita en los sistemas anteriores.

La metodología utilizada es similar a la utilizada en el circuito de distribución en cuanto a pérdidas de carga tanto de las conducciones como localizadas.

##### 7.5.5.2. Modelo

El modelo introducido en el programa reproduce una geometría ficticia del circuito manteniendo sus longitudes estimadas. En la figura nº111 se muestra la geometría introducida en el programa:

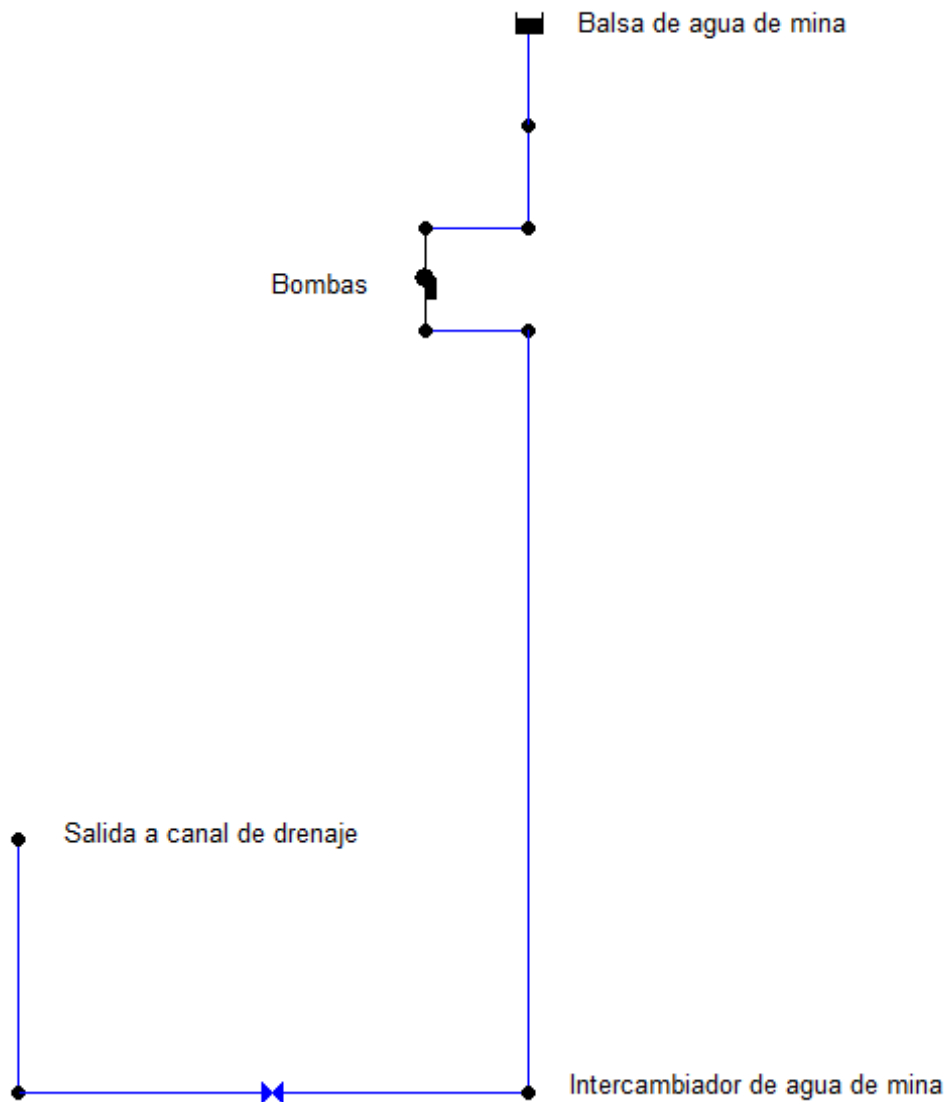


Figura nº111. Geometría del modelo introducido en EPANET.

Se supone un desnivel de 5 metros en el circuito para simular la diferencia de cota que puede haber dentro del circuito. El intercambiador de agua de mina se simula como una válvula que produce una pérdida de carga determinada e igual a la resultante del cálculo del intercambiador.

### 7.5.5.3. Datos de partida

Los datos de partida que necesita el programa son los mismos que en la modelización del circuito de distribución. La rugosidad de la tubería, igual que en casos anteriores, es de 0,03 mm.



### Caudal del circuito

El caudal del circuito de evaporador viene fijado por el dimensionamiento del intercambiador de agua de mina en el cual se ha supuesto que los caudales de los circuitos primario y secundario son iguales. Por esta razón, el caudal es igual a 60,70 l/s. Al disponer dos bombas en paralelo, pero forzando a que trabaje solo una, para tener la otra de reserva, el caudal que circula por la bomba es el íntegro, correspondiente a los 60,70 l/s.

### Pérdida de carga de los elementos del circuito

La pérdida de carga que experimenta el fluido tras su paso por el intercambiador de calor de agua de mina, tal y como se refleja en el dimensionamiento del mismo, es de 93,8 kPa, que si se transforma a metros columna de agua se obtienen 9,38 mca.

#### **7.5.5.4. Resultados**

En este apartado se presentan los resultados hidráulicos de la red.

### Bombas

Las bombas del circuito de agua de mina se han dimensionado para garantizar que el caudal demandado llega a todos los puntos del circuito.

Se ha impuesto que haya al menos presión mínima de 2,00 m.c.a. en todos los puntos del circuito lo que implica que las bombas tengan una altura de impulsión de 11,86 m.c.a. Se aplica un sobredimensionamiento del 20%, luego, la altura de diseño es 14,23 m.c.a.

Con el caudal de diseño (60,70 l/s) y la altura de diseño (14,23 m.c.a.) se obtiene la potencia de las bombas, tal y como se expresó en la modelización del circuito de distribución. En la tabla nº207 se muestran los resultados del cálculo de las bombas de agua de mina.

| <b>Bombas</b>                             |           |
|---|-----------|
| <b>Parámetro</b>                          | <b>E1</b> |
| Configuración                             | 1+1       |
| Caudal cálculo (l/s)                      | 60,70     |
| Altura cálculo (m)                        | 11,86     |
| Caudal de diseño (l/s)                    | 60,70     |
| Altura diseño (l/s)                       | 14,23     |
| Peso específico agua (kN/m <sup>3</sup> ) | 10,00     |
| Potencia (kW)                             | 8,64      |

Tabla nº207. Resumen de dimensionamiento de las bombas de agua de mina.



### Resultados en los nudos de la red

En la figura nº112 se muestran las presiones de los nudos del circuito de condensación:

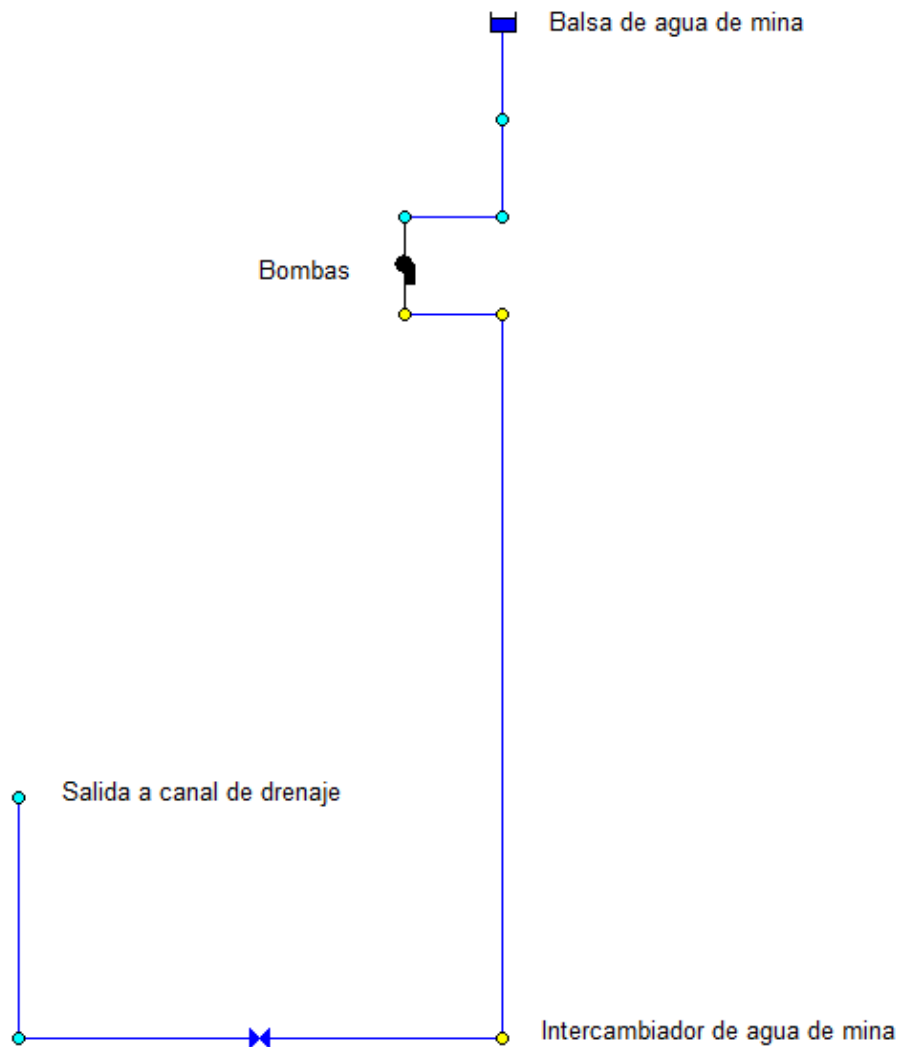


Figura nº112. Presión en los nudos del circuito de condensación.

La presión en la aspiración de las bombas es de 4,86 m.c.a. mientras que la presión en la impulsión es de 16,72 m.c.a., siendo este el punto con mayor presión del circuito.

### Resultados en conducciones

En la tabla nº208 se recogen los resultados las conducciones del circuito de condensación, en concreto, diámetros, caudales y velocidades.



| Conducciones          |              |              |                 |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| Tramo                 | Diámetro (") | Caudal (l/s) | Velocidad (m/s) |
| Circuito agua de mina | 8"           | 60,70        | 1,75            |

Tabla n°208. Resultados de las conducciones del circuito de agua de mina.

La velocidad en las conducciones del circuito es correcta ya que se encuentra entre 0,5 m/s y 2,5 m/s (Kayode 2007; Martínez 2000).

#### 7.5.5.5. Cálculo térmico de las conducciones

El cálculo térmico de las conducciones del circuito de evaporación se va a realizar utilizando la misma metodología y formulación empleada en el circuito de condensación.

#### Datos de partida

El aislamiento propuesto el mismo que en el circuito de condensación. La conductividad térmica de este material es 0,05 W/mK (Ohmura, T., Tsuboi, M. & Tomimura 2002). Teniendo en cuenta que la longitud total del circuito es de 136,82 metros, que la temperatura del fluido son 14°C y la temperatura ambiente a lo largo del año se estima en 5°C, se puede obtener la pérdida térmica en la conducción.

#### Resultados

Comparando transferencia térmica del fluido en el circuito de agua de mina con la potencia térmica de la instalación (1.922 kW) se puede obtener el porcentaje de pérdidas del circuito. En la tabla n°209 se muestran los resultados del cálculo térmico del circuito de agua de mina.

| Parámetro                                    | Valor           |
|--|-----------------|
| Temperatura fluido (°C)                      | 14,00           |
| Temperatura ambiente (°C)                    | 5,00            |
| Conductividad térmica del aislamiento (W/mK) | 0,05            |
| Longitud (m)                                 | 136,82          |
| Radio exterior aislamiento (m)               | 0,1495          |
| Radio interior aislamiento (m)               | 0,1095          |
| <b>Transferencia Térmica (W)</b>             | <b>2.860,74</b> |
| Potencia térmica inicial (W)                 | 1.922.000,00    |
| <b>Pérdida térmica</b>                       | <b>0,15%</b>    |

Tabla n°209. Cálculo de la pérdida térmica del circuito de condensación.



Se obtienen unas pérdidas térmicas del 0,15% inferiores al 4% estipulado por el RITE, por lo tanto, el diseño del aislamiento se considera adecuado.

#### 7.5.6. Separador hidráulico

Un separador hidráulico, desacoplador hidráulico o compensador hidráulico, es un elemento utilizado en redes hidráulicas para independizar circuitos. Se trata de un tramo de tubería de gran diámetro que tiene poca resistencia al paso de caudal donde se conectan los diversos circuitos a independizar. Es muy utilizado en sistemas de calefacción en los que no se quiere que las alteraciones de demanda de un cliente afecten al resto (Frederiksen, S. & Werner 2013; Yavorovsky, Y.V, Romanov, D.O. & Khromchenkov 2018). Otra de sus funciones es evitar problemas hidráulicos cuando existen varios sistemas de impulsión en serie con distintos parámetros de trabajo (Ponce 2012). Esta función es la que se tiene en cuenta en este estudio.

Los sistemas de impulsión puestos en serie son el circuito de condensación, que tiene que hacer pasar el agua por los condensadores de las enfriadoras, y el circuito de distribución, que tiene que impulsar el agua caliente hasta los clientes. La razón por la que se independizan estos dos circuitos es porque el circuito de distribución va a experimentar una gran variación de caudal debido a la demanda cambiante de los clientes. El circuito de condensación no puede verse afectado directamente por estos cambios de caudal debido a que el ciclo termodinámico de las enfriadoras se vería resentido disminuyendo su eficiencia en gran medida (Romanov, D.O., Yavorovsky, Y.V. & Smirnov 2019).

Las principales ventajas de disponer un separador hidráulico en una red de calor son las siguientes (Ponce 2012):

- Se minimizan las situaciones en las que las bombas trabajan fuera de curva, aumentando la eficiencia del sistema.
- Los sistemas de clientes del secundario pueden trabajar independientemente.
- Se asegura que los generadores tengan un flujo de calor independiente de los circuitos de consumo.
- Se evitan desequilibrios hidráulicos entre circuitos y generadores.
- Se favorece la rotura de microburbujas de aire, así como la eliminación de impurezas y fangos en los circuitos.
- Proporciona un ahorro eléctrico ya que evita la instalación de válvulas de regulación o bombas de refuerzo (Romanov, D.O., Yavorovsky, Y.V. & Smirnov 2019).



### 7.5.6.1. *Funcionamiento de un separador hidráulico*

Dependiendo de la relación entre caudales de los circuitos de entrada y de salida del separador se pueden dar tres situaciones (Ponce 2012):

1. Los caudales del circuito primario y secundario son iguales.
2. El caudal del circuito primario es mayor que el del secundario.
3. El caudal del circuito primario es menor que el del secundario.

El primer caso se trata de una solución ideal que rara vez se va a dar. Todo el caudal que entra en el primario sale por el secundario y en el retorno, todo el caudal que entra por el secundario sale por el primario. Esta situación se refleja en la figura nº113.

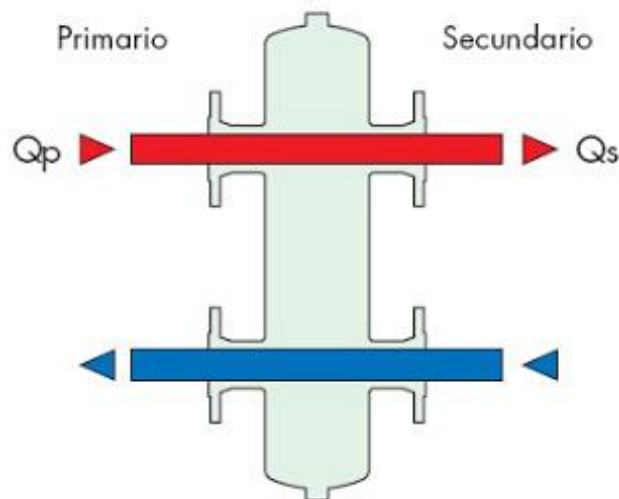


Figura nº113. Funcionamiento de separador hidráulico cuando  $Q_p = Q_s$  (Ponce 2012).

En el segundo caso se produce una recirculación de agua caliente en el primario, en el caso que nos ocupa el circuito de condensación. Esto es una situación favorable ya que cuanto más temperatura tenga el retorno mayor rendimiento va a haber en la enfriadora. En la figura nº114 se muestra esta situación.

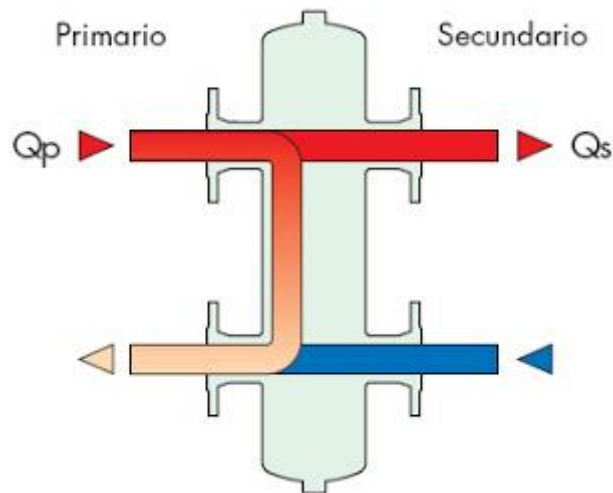


Figura nº114. Funcionamiento de separador hidráulico cuando  $Q_p > Q_s$  (Ponce 2012).

En el tercer caso se produce una circulación en dentro del separador hidráulico en la que se devuelve agua fría el circuito de distribución sin haber pasado por las enfriadoras. Esto es un caso desfavorable ya que se mezcla agua fría con agua caliente y se envía a los clientes pudiendo generar problemas para alcanzar la demanda térmica en las subestaciones. En la figura nº115 se muestra esta situación.

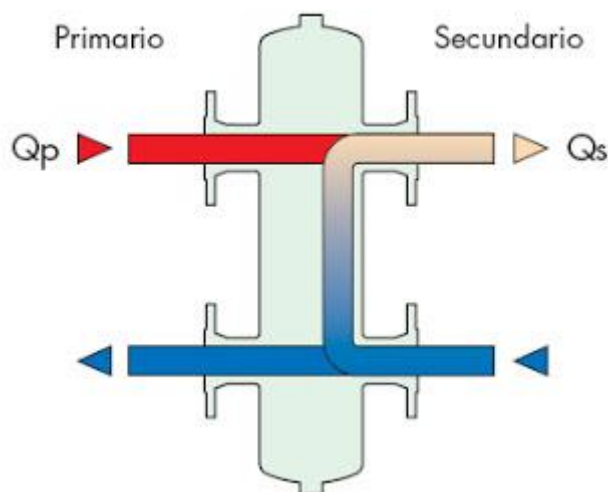


Figura nº115. Funcionamiento de separador hidráulico cuando  $Q_p < Q_s$  (Ponce 2012).

#### 7.5.6.2. Dimensionamiento del separador hidráulico

Para dimensionar un separador hidráulico se suelen tener en cuenta dos aspectos, la pérdida de carga del mismo y su velocidad. Para garantizar la separación hidráulica la pérdida de





carga que se produce en el separador no debería superar el 10 % de la presión diferencial de los circuitos primario más secundario (Arroyo 2012). Por otro lado, para garantizar que se produce la eliminación de burbujas y que se decantan impurezas debe haber una velocidad baja en el separador. Se considera que una velocidad efectiva para conseguir este efecto es del orden de 0,10 m/s (Romanov, D.O. & Yavorovsky 2019).

La reducción de la pérdida de carga y de la velocidad se consiguen aumentando la sección del separador, sin embargo, no puede ser demasiado grande ya que podrían producirse recirculaciones en ambos circuitos sin que se produzca de manera natural la transmisión de caudal entre el circuito primario y el secundario (Ponce 2012).

Para valores de velocidad en los circuitos usuales (1 m/s) se considera suficiente con que el diámetro del separador hidráulico sea tres veces el diámetro de la tubería de entrada del circuito primario. Dependiendo de la velocidad del circuito o de la existencia de un deflector de flujo pueden disponerse las entradas y salidas del separador enfrentadas o alternadas.

En el diseño del separador hidráulico de la red de calor de Villablino se considera mejor opción disponer las entradas y salidas alternadas para reducir la probabilidad de existencia de recirculaciones en los circuitos.

En la figura nº116 se puede observar la distribución de entradas y salidas usual para un separador que cuenta con una entrada y una salida en el primario y con otra entrada y salida en el secundario.

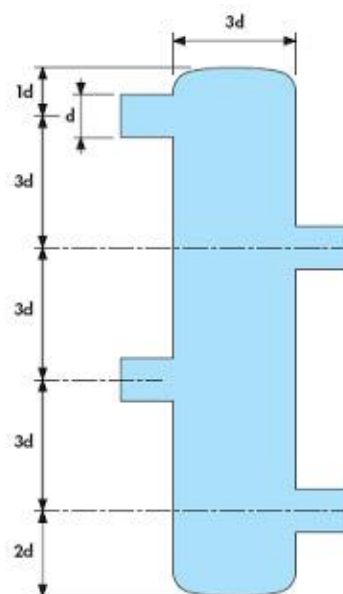


Figura nº116. Diseño de separador hidráulico con entradas y salidas alternadas (Arroyo 2012).



En la red de calor el diámetro de entrada del primario en el separador es de 8 pulgadas, por lo tanto, el diseño del separador quedaría como se puede ver en la figura nº117:

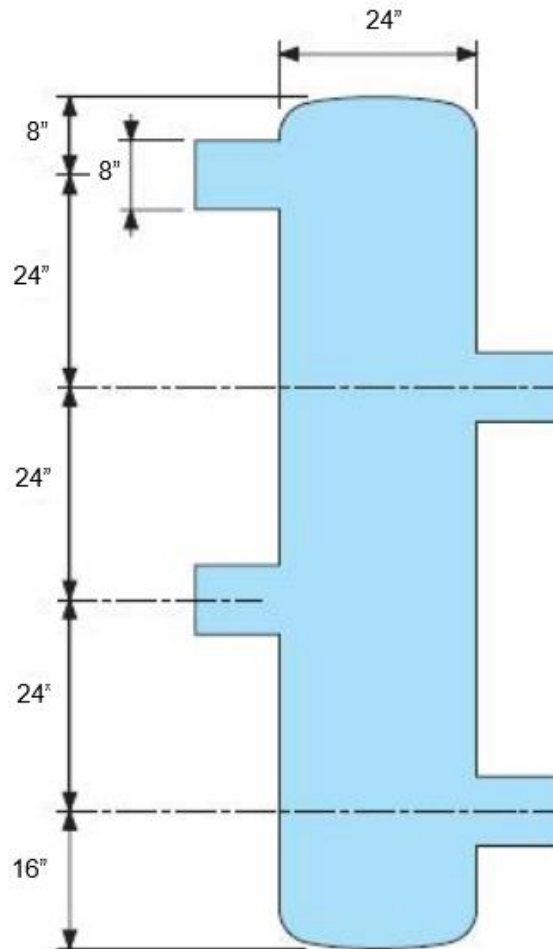


Figura nº117. Diseño de separador hidráulico de la red de calor de Villablino.

### 7.5.7. Zanjas

Las zanjas son excavaciones lineales de poca profundidad y poca anchura que albergan una tubería, conducto o elemento subterráneo. Las tuberías de la red de calor de Villablino van a ser dispuestas en zanjas que irán desde la sala de generación hasta cada uno de los clientes. De esta manera se puede construir una red de calor sin ocupar terreno en la superficie.

La tipología y dimensiones de las zanjas dependen del tamaño de tubería, de la geología del terreno, de las cargas que vaya a sufrir la tubería desde el exterior y de la tipología del terreno afectado en superficie.



Siguiendo los ejemplos de (Fernández 2018) y (García-Carro, F.M. & Solís 2019) se van a diferenciar cuatro tipos de zanjas en función del tipo de urbanización o terreno afectado y en función de la profundidad:

- Zanja tipo 1: Zanja por zona con pavimento aglomerado hasta 1,50 m. de profundidad.
- Zanja tipo 2: Zanja por zona con vegetación hasta 1,50 m. de profundidad
- Zanja tipo 3: Zanja por zona con pavimento, acera y losa de hormigón de protección hasta 1,50 m. de profundidad
- Zanja tipo 4: Zanja con profundidad superior a 1,50 m con necesidad de entibación, en cualquier tipo de zona (pavimento aglomerado, vegetación o acera).

Para la definición de los parámetros geométricos mínimos se van a seguir las “Normas para redes de abastecimiento” del Canal de Isabel II de Madrid (Canal de Isabel II 2012).

Como se puede observar en la clasificación de zanjas, la profundidad máxima para disponer entibaciones son 1,50 metros, siguiendo un criterio de seguridad.

La anchura mínima de la zanja en su parte inferior viene determinada por el diámetro nominal y el número de las conducciones a disponer. En general, para conducciones con diámetro menor de 350 mm., como es el caso, se debe disponer una anchura de zanja igual al diámetro exterior de la tubería más 50 cm. Además, en caso de disponerse dos o más tuberías en horizontal, las generatrices exteriores deberán estar separadas al menos 35 cm. Siguiendo estos criterios se ha obtenido la anchura mínima de zanja según el diámetro de tubería dispuesto y se refleja en la tabla nº210:

| <b>Anchura mínima de zanjas</b> |                                 |                                     |                           |                           |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>DN (mm)</b>                  | <b>Espesor aislamiento (mm)</b> | <b>Diámetro exterior total (mm)</b> | <b>Número de tuberías</b> | <b>Anchura mínima (m)</b> |
| 90                              | 32,00                           | 154,00                              | 2                         | 1,16                      |
| 110                             | 41,80                           | 193,60                              | 2                         | 1,24                      |
| 125                             | 46,60                           | 218,20                              | 2                         | 1,29                      |
| 200                             | 123,60                          | 447,20                              | 2                         | 1,74                      |
| 250                             | 132,33                          | 514,66                              | 2                         | 1,88                      |

Tabla nº210. Anchura mínima de zanjas.

La profundidad de la zanja deberá garantizar que haya al menos un metro de recubrimiento entre las generatrices superiores de la tubería y la superficie. En caso de que no sea posible obtener esta profundidad será necesaria la ejecución de una losa de hormigón que proteja la tubería frente a las cargas de la superficie.



La pendiente de las zanjas debe ser al menos del 0,2% para permitir la conducción de las aguas en caso de lluvia hacia pozos de bombeo que permitan extraer las aguas acumuladas en las excavaciones.

La tubería no debe apoyarse de manera puntual en ningún punto de su longitud, por ello, es prescriptivo la ejecución de una cama de arena que esté en contacto con la tubería al menos en los 60° inferiores. De esta manera se asegura que las tensiones del tubo son transmitidas uniformemente al terreno sin existir ninguna arista o punto donde se concentren las mismas.

En este estudio se va a tomar un criterio más restrictivo al respecto de la cama de arena (García-Carro, F.M. & Solís 2019). Se van a recubrir todas las tuberías y la canalización de comunicaciones (tubo corrugado de 90 mm. de diámetro), que va por encima de las mismas, con el material utilizado en la cama de arena, al menos con una holgura de 10 cm. por encima de la canalización de comunicaciones.

El espesor mínimo de las camas de arena por debajo de las conducciones geotérmicas debe ser al menos de 15 cm., por lo tanto, para mantener el metro de recubrimiento entre la generatriz superior de las conducciones geotérmicas y la superficie, la profundidad mínima de las zanjas según el diámetro debe ser la que se refleja en la tabla n°211:

| <b>Profundidad mínima de zanjas</b> |                                 |                                     |                                  |                               |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| <b>DN (mm)</b>                      | <b>Espesor aislamiento (mm)</b> | <b>Diámetro exterior total (mm)</b> | <b>Espesor cama de arena (m)</b> | <b>Profundidad mínima (m)</b> |
| 90                                  | 32,00                           | 154,00                              | 0,15                             | 1,30                          |
| 110                                 | 41,80                           | 193,60                              | 0,15                             | 1,34                          |
| 125                                 | 46,60                           | 218,20                              | 0,15                             | 1,37                          |
| 200                                 | 123,60                          | 447,20                              | 0,15                             | 1,60                          |
| 250                                 | 132,33                          | 514,66                              | 0,15                             | 1,66                          |

Tabla n°211. Profundidad mínima de zanja.

## 7.6. SALAS TÉCNICAS

En este apartado se van a definir las actuaciones a llevar a cabo en las diferentes salas técnicas de los clientes.

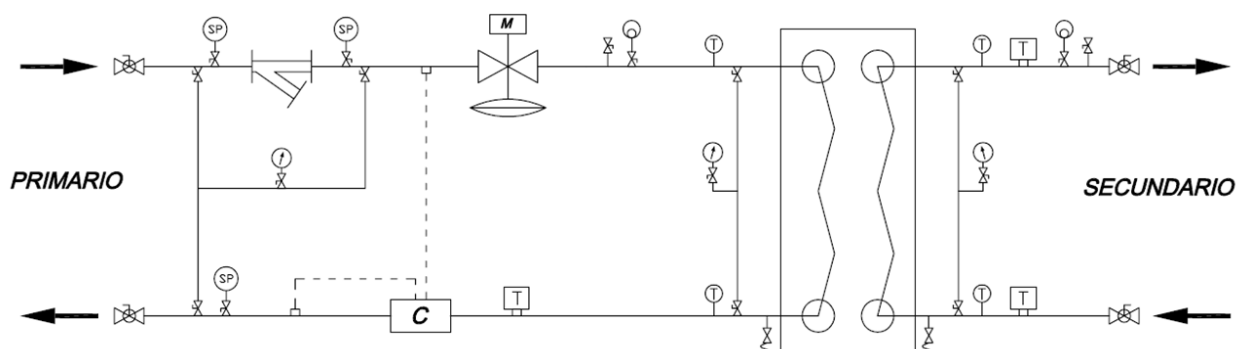
En primer lugar, se van a describir los elementos existentes en la sala técnica. Se describirán las salas geoméricamente y se darán detalles de sus elementos hidráulicos y térmicos.

Posteriormente, se diseñarán las estaciones de intercambio y las conexiones necesarias a llevar a cabo para implementar la red de calor dentro del sistema de calefacción de los clientes. La implantación de los elementos se reflejará sobre planos que se recogerán en el anexo de documentación gráfica correspondiente.

Es necesario destacar que no se ha tenido acceso a los esquemas de principio de las salas técnicas, por lo tanto, es probable que los esquemas de principio elaborados en este estudio no recojan fielmente la realidad. Esto es así debido a que se han elaborado a partir de lo observado en las visitas técnicas, sin embargo, no se han podido seguir los circuitos para ver sus ramificaciones ni se ha podido recoger toda la información en cuanto a elementos hidráulicos del circuito se refiere. No obstante, se ha obtenido la suficiente información para realizar una implantación estimativa de equipos y para definir la conexión entre la red de calor y el sistema de calefacción existente en cada una de las salas.

### 7.6.1. Diseño de las subestaciones de intercambio

Las subestaciones térmicas que se pretenden implantar en las salas técnicas son unos equipos que realizan un intercambio de calor entre el circuito de distribución y el circuito de calefacción del edificio. Esta transferencia térmica se realiza mediante un intercambiador de calor de placas. El esquema general de una subestación de intercambio se muestra en la figura nº118 (Fernández 2018):















|  |  |
|--|--|
|  <b>INTERCAMBIADOR</b>      |  <b>VÁLVULA DE BOLA SOLDADA</b> |
|  <b>VÁLVULA DE BOLA</b>     |  <b>SONDA DE TEMPERATURA</b>    |
|  <b>FILTRO</b>              |  <b>TERMÓMETRO</b>              |
|  <b>VÁLVULA COMBINADA</b>   |  <b>MANÓMETRO</b>               |
|  <b>CONTADOR DE ENERGÍA</b> |  <b>PURGADOR</b>                |

Figura nº118. Esquema de subestación de intercambio y leyenda.

Las partes principales de la misma son el intercambiador de calor, la válvula micrométrica para la regulación del caudal que entra en la misma y el contador de calor que se dispone a la salida del primario. Además, también dispone de la instrumentación correspondiente y elementos de protección hidráulica como filtros, purgadores, baipases o válvulas de corte.

### 7.6.2. Diseño de los intercambiadores de calor de placas

El cálculo de los intercambiadores de placas de las subestaciones de la red de calor de Villablino se ha realizado con el programa especializado HTRI Xchanger Suite 7 -HON, el cual se trata de un software para dimensionar, simular y diseñar una amplia gama de intercambiadores de calor desarrollado por Heat Transfer Research, Inc.

El objetivo del cálculo es diseñar unos intercambiadores que realicen una transmisión de calor lo más eficiente posible dentro de los parámetros de trabajo tenidos en cuenta.

#### 7.6.2.1. Partes de un intercambiador de calor de placas

En la figura nº119 se pueden ver las distintas partes y componentes que conforman un intercambiador de calor de placas (M. Gut, J.A.W. & Pinto 2004):

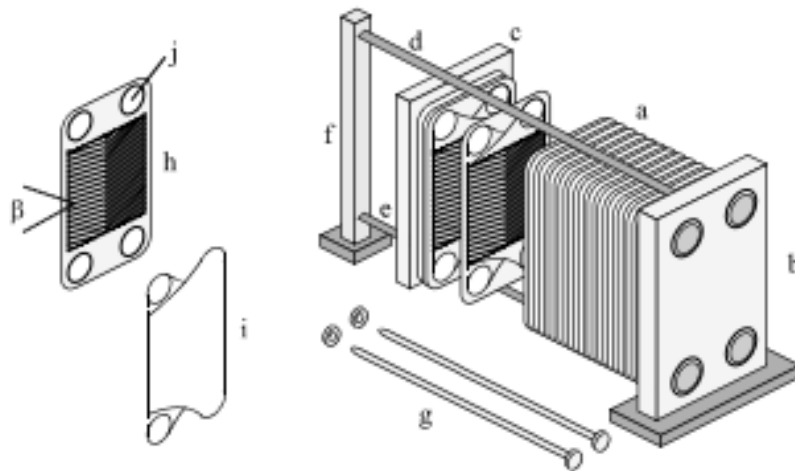


Figura nº119. Partes de un intercambiador de calor de placas.

La leyenda de la figura anterior se detalla en el siguiente listado:

- a) Conjunto de placas
- b) Tapa final fija.
- c) Tapa final móvil.
- d) Barra de sujeción superior.
- e) Barra de sujeción inferior.
- f) Columna.
- g) Pernos de apriete.
- h) Placa de intercambio corrugada.
- i) Junta de las placas.
- j) Ventana de las placas.
- β) Ángulo de las corrugas.

#### 7.6.2.2. *Parámetros de un intercambiador de calor*

##### Parámetros de configuración del intercambiador

El flujo en las placas y su recorrido puede tener diversas configuraciones dependiendo de las juntas utilizadas entre placas. Se distinguen seis parámetros que caracterizan el intercambiador (J. M. Gut, J.A.W. & Pinto 2003).

- Número de canales ( $N_c$ ): corresponde al número total de espacios que existen entre placas y por los que pasarán los fluidos. En general, por los canales impares pasa el fluido I y por los canales pares pasa el fluido II.



- Número de pasos del lado I ( $P^I$ ): Un paso es el conjunto de canales por los que se distribuye el fluido. Si en el lado I del intercambiador se tienen tres pasos y cada paso tiene cinco canales quiere decir que el fluido va a pasar en paralelo por cinco canales y se va a encontrar la misma configuración en serie tres veces. Es decir, habría un conjunto de cinco canales en paralelo dispuestos tres veces en serie, lo que quiere decir que en el lado I habría un total de 15 canales.
- Número de pasos del lado II ( $P^{II}$ ): La definición es la misma que la anterior, pero para el fluido del lado II. Si se toma el mismo ejemplo que antes habría 15 canales también en el lado II y, por tanto,  $N_c$  sería 30.
- Posición de la alimentación ( $\phi$ ): La posición de alimentación del lado I es arbitraria, el parámetro  $\phi$  lo que define es la posición de alimentación del lado II con respecto al lado I. Supongamos que la alimentación del lado I se hace por la parte inferior de las placas en el lado de tapa fija (izquierda). Existen cuatro (4) opciones para este parámetro:
  - $\phi = 1$ : La alimentación del lado II se encuentra en la misma zona (inferior) que en el lado I, los flujos en las puertas son cocorriente.
  - $\phi = 2$ : La alimentación del lado II se encuentra en la zona contraria (superior) que en el lado I, los flujos en las puertas son cocorriente.
  - $\phi = 3$ : La alimentación del lado II se encuentra en la misma zona (inferior) que en el lado I, los flujos en las puertas son contracorriente, porque la alimentación del lado II empieza por la tapa móvil (derecha).
  - $\phi = 4$ : La alimentación del lado II se encuentra en la zona contraria (superior) que en el lado I, los flujos en las puertas son contracorriente, porque la alimentación del lado II empieza por la tapa móvil (derecha).

En la figura nº120 se pueden ver las distintas opciones de posición de alimentación:



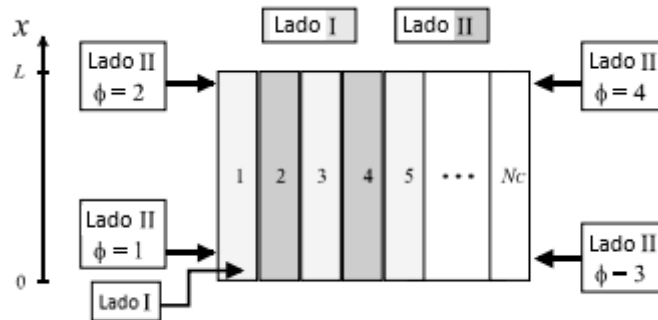


Figura nº120. Posibilidades de alimentación del intercambiador. Adaptado de (M. Gut, J.A.W. & Pinto 2004).

- Localización del fluido caliente ( $Y_h$ ): Este parámetro puede tener los valores 0 o 1 y refleja en qué lado se encuentra el fluido caliente. Si  $Y_h=1$ , entonces el fluido caliente se encuentra en el lado I. Si  $Y_h=0$ , entonces el fluido caliente se encuentra en el lado II.
- Tipo de flujo en los canales ( $Y_f$ ): Este parámetro puede tener los valores 0 o 1 y refleja el tipo de flujo dentro de los canales. Si  $Y_f=1$ , entonces el tipo de flujo es diagonal en todos los canales. Si  $Y_f=0$ , entonces el tipo de flujo es vertical en todos los canales. Este parámetro depende del tipo de juntas a utilizar. Los distintos tipos de flujo se pueden observar en la figura nº121:

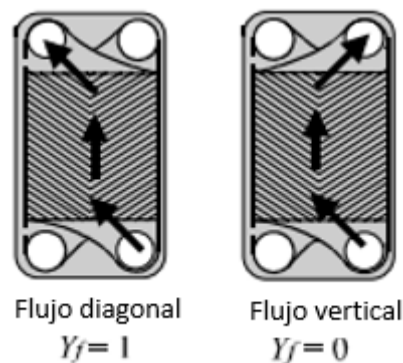


Figura nº121. Tipos de flujo en los canales. Adaptado de (M. Gut, J.A.W. & Pinto 2004).

Para ilustrar los parámetros anteriormente citados se presenta la figura nº122, donde se muestra un ejemplo que tendría la siguiente caracterización:

- $N_c = 8$
- $P^l = 2$



- $P^{II} = 4$
- $\phi = 1$
- $Y_h = 1$
- $Y_f = 1$

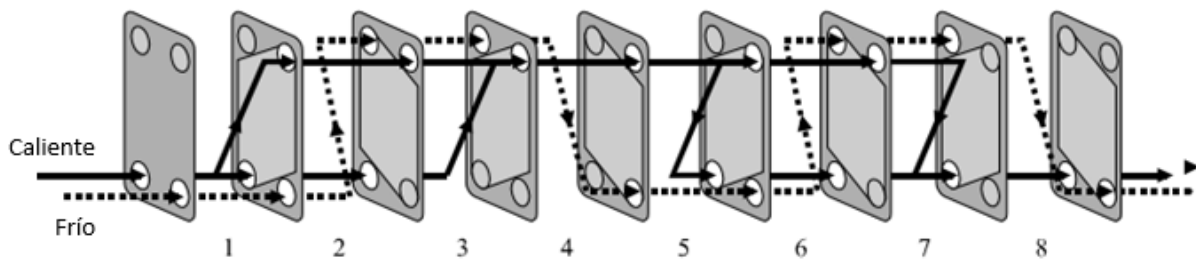


Figura nº122. Ejemplo de configuración de intercambiador. Adaptado de (M. Gut, J.A.W. & Pinto 2004).

### Parámetros de las placas

Existen numerosas marcas comerciales con diversos modelos de placas, cada uno con sus propias características. La diferencia de unos modelos a otros es el valor que adoptan los parámetros de las placas, los cuales se citan a continuación:

- Superficie de la placa, que influye directamente en la superficie de transferencia de la misma.
- Ángulo de las corrugas de la placa. Los más usuales son 30°, 45°, 60°, 90°, aunque hay algunos fabricantes que utilizan otros (23; 30,6; 47,5; 48; 52,5; 61,3; etc.) .
- Anchura de los canales. Se da en mm e influye tanto en el espacio ocupado como en el rendimiento del intercambiador. Se trata de uno de los parámetros que más influye en el rendimiento.
- Diámetro de las ventanas. Se trata de la abertura que conecta los distintos canales. Cuanto mayor es un intercambiador de placas, mayor suele ser el tamaño de sus placas. Normalmente son circulares (M. Gut, J.A.W. & Pinto 2004).

#### **7.6.2.3. Criterios de diseño**

El objetivo de este apartado es resumir los criterios de diseño tenidos en cuenta para diseñar el intercambiador de placas.

A continuación, se muestra un listado con los criterios de diseño tenidos en cuenta para diseñar el intercambiador:



- Las velocidades mínimas del fluido entre placas y en las ventanas (Arsenyeva, O.P., Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O. & Khavin 2011) que conectan las distintas placas se limita al entorno de los 0,5 m/s.
- El sobredimensionamiento debe ser positivo, de lo contrario la superficie de transferencia es menor que la estrictamente necesaria para realizar el intercambio térmico correctamente.
- Se limita la pérdida de carga del intercambiador al entorno de los 5 kPa, límite similar al que se impuso a la pérdida de carga de una carcasa del intercambiador de calor (Mukherjee 1998), y menor que el máximo estipulado por (Wang, L. & Sund 2003) de 120 kPa.
- Se intenta disponer el menor número de placas posibles debido a que es el aspecto que más influye en el coste del intercambiador (Arsenyeva, O.P., Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O. & Khavin 2011).

#### 7.6.2.4. Metodología

La metodología utilizada para diseñar los distintos intercambiadores ha sido la siguiente:

1. En primer lugar, se establece el tipo de placa a utilizar. Este paso es muy importante ya que la optimización del diseño depende de encontrar el mejor tipo de placa para las condiciones de estudio (Arsenyeva, O.P., Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O. & Khavin 2011). De entre todas las opciones de placas distintas que contiene la biblioteca del programa HTRI Xchanger Suite 7 -HON, se acota la primera elección de placa por fabricante y por el diámetro de la ventana entre placas. El fabricante elegido para la primera opción de placa es Alfa Laval mientras que el diámetro de ventana considerado es el que hace que la velocidad del fluido en la ventana esté entre 0,5 y 1 m/s.
2. Las placas de Alfa Laval tienen únicamente como opciones de ángulo de corruga 30° y 60°. Se ha elegido siempre como primera opción 30° ya que es la opción que da menos pérdida de carga. Para cada modelo de placa existen diversas opciones dependiendo de la distancia entre placas (anchura de canales), para la primera elección se utiliza una anchura entre placas media, en torno a los 2,5 mm.
3. En cuanto a la configuración del intercambiador se ha considerado en la primera opción 1 paso, 20 canales, flujo diagonal y que el fluido caliente discurre por la zona I.
4. Con esta primera elección de placa se ejecuta el programa y se ve qué resultados arroja. Dependiendo de los resultados se toma la decisión de cambiar de placa (para



cambiar la anchura de canal) o se manipulan el resto de los parámetros para llegar a valores razonables de sobredimensionamiento, pérdida de carga y velocidades. En general, en esta primera iteración, se buscan unos valores altos de velocidad (superiores a 1 m/s), unos valores razonables de pérdida de carga (inferiores a 80 kPa) y unos valores de sobredimensionamiento poco negativos (superiores a -30,00%). En general, para conseguir esto es necesario incluir 2 o más pasos en el intercambiador.

5. Si conseguimos estos valores de velocidad, pérdida de carga y sobredimensionamiento podemos hallar una solución viable aumentando el número de placas, lo que va a hacer reducir la velocidad, reducir la pérdida de carga y aumentar el sobredimensionamiento hasta llegar a unos valores aceptables (velocidad > 0,5 m/s; pérdida de carga < 50 kPa; sobredimensionamiento > 0,00%).

#### **7.6.2.5. Diseño de los intercambiadores de las salas técnicas**

##### **Datos de partida generales**

Los datos de los que se ha partido para realizar el cálculo y que son inamovibles debido a las condiciones de operación de la red de calor son los siguientes:

- Temperatura de entrada y salida del fluido caliente (circuito de distribución): Estos valores se obtienen en el cálculo térmico de las conducciones del circuito de distribución.
- Temperatura de entrada y salida del fluido frío (circuito de calefacción del cliente): La temperatura del agua de salida del fluido frío no puede ser tan alta como la de entrada del fluido caliente y se han supuesto 5°C de diferencia. Además, se estima que el salto térmico es igual que en el fluido caliente.
- Caudal de los circuitos primarios y secundarios del intercambiador: El circuito primario corresponde al circuito de distribución de la red de calor y el circuito secundario corresponde al circuito de calefacción del cliente. Se van a dimensionar los intercambiadores de calor para la situación en la que más temperatura tienen que transmitir, es decir, se demanda la potencia máxima según los escenarios vistos en los cálculos hidráulicos del circuito de distribución. Se estima que el caudal en el circuito secundario es igual al caudal en el circuito primario.

El resto de los parámetros de partida han sido fijados según recomendaciones bibliográficas y/o con hipótesis razonables, según los criterios de diseño estipulados. No obstante, han estado sujetos a modificaciones en la optimización del intercambiador:



- La presión de operación se ha fijado en el entorno de 300 kPa.
- La caída de presión permitida se ha fijado en 50 kPa.
- La resistencia al incrustamiento: siguiendo las recomendaciones del documento (TEMA 2007) para agua en pozos, se ha fijado en 0,00017 m<sup>2</sup>K/W.
- Las propiedades físicas de los fluidos de trabajo: entre estas propiedades se incluyen la viscosidad, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico: Se han utilizado los parámetros del agua líquida.
- Tipo de flujo: diagonal ( $Y_f = 1$ ).
- Posición relativa de las alimentaciones: se fija la alimentación de las partes I y II por la parte inferior del intercambiador y enfrentadas ( $\phi = 3$ ).
- Tipo de placa: Depende de cada situación y se especificará para cada cliente.

Estos datos de partida son iguales para el diseño de todos los intercambiadores exceptuando las temperaturas del primario y secundario, los caudales de diseño y los tipos de placa en la primera simulación. En la tabla nº212 se recogen las temperaturas y los caudales de diseño para cada intercambiador.

| Subestaciones de intercambio | Primario          |                   | Secundario        |                   | Caudal (l/s) |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
|                              | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> |              |
| IES Obispo Argüelles A       | 71,80             | 62,60             | 57,60             | 66,80             | 9,81         |
| IES Obispo Argüelles B       | 71,90             | 62,50             | 57,50             | 66,90             | 5,22         |
| IES Obispo Argüelles C       | 71,70             | 62,70             | 57,70             | 66,70             | 3,45         |
| Ayuntamiento                 | 72,00             | 62,40             | 57,40             | 67,00             | 3,24         |
| Casa de la Cultura           | 71,80             | 62,50             | 57,50             | 66,80             | 2,91         |
| Centro de Salud              | 72,60             | 62,00             | 57,00             | 67,60             | 26,85        |
| Colegio San Miguel           | 71,70             | 62,70             | 57,70             | 66,70             | 4,65         |
| Polideportivo                | 72,10             | 62,30             | 57,30             | 67,10             | 6,65         |

Tabla nº212. Temperaturas y caudales de diseño de los intercambiadores de las subestaciones.

Esta tabla se ha elaborado teniendo en cuenta la suposición de 5°C de diferencia entre la salida de fluido frío y la entrada del fluido caliente, y la estimación de que el salto térmico es igual en el fluido caliente y en el fluido frío. Estas suposiciones pueden utilizarse en caso de que se desconozca la temperatura real de los circuitos de los clientes. Sin embargo, de las visitas técnicas se ha podido conocer la temperatura real de los mismos a través de la lectura



de los termómetros existentes en las distintas salas. Esta medición se ha podido hacer únicamente en las salas técnicas del IES Obispo Argüelles y en la Casa de la Cultura, lo cual se muestra en la tabla nº213:

| Subestaciones de intercambio | Primario          |                   | Secundario estimado |                   | Secundario real   |                   |
|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                              | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> | T <sup>aent</sup>   | T <sup>asal</sup> | T <sup>aent</sup> | T <sup>asal</sup> |
| IES Obispo Argüelles A       | 71,80             | 62,60             | 57,60               | 66,80             | 50,00             | 60,00             |
| IES Obispo Argüelles B       | 71,90             | 62,50             | 57,50               | 66,90             | 60,00             | 69,00             |
| IES Obispo Argüelles C       | 71,70             | 62,70             | 57,70               | 66,70             | 70,00             | 80,00             |
| Ayuntamiento                 | 72,00             | 62,40             | 57,40               | 67,00             | 57,40             | 67,00             |
| Casa de la Cultura           | 71,80             | 62,50             | 57,50               | 66,80             | 40,00             | 49,00             |
| Centro de Salud              | 72,60             | 62,00             | 57,00               | 67,60             | 57,00             | 67,60             |
| Colegio San Miguel           | 71,70             | 62,70             | 57,70               | 66,70             | 57,70             | 66,70             |
| Polideportivo                | 72,10             | 62,30             | 57,30               | 67,10             | 57,30             | 67,10             |

Tabla nº213. Temperaturas de secundarios estimados y reales en las subestaciones.

En los casos del IES A y de la Casa de la Cultura, los supuestos de la temperatura de los secundarios de las subestaciones son más restrictivos que la realidad, por ello, se considera adecuado hacer el cálculo con el secundario estimado.

En el caso del IES B e IES C, la situación real es más desfavorable que en la situación estimada. De hecho, en el IES C no se podrían alcanzar en ningún caso los 80°C registrados en la visita. En este caso, las calderas auxiliares deberían dar la última subida de temperatura de 67,60°C a los 80°C necesarios. Por lo tanto, se va a mantener el diseño de la situación estimada.

En el caso del IES B, se van a hacer los cálculos con la situación estimada y con la situación real para ver la diferencia que hay entre los dos y poder presentar ambas.

### Ayuntamiento de Villablino

#### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo M10-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,591 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 100 mm, y una superficie de placa de 0,242 m<sup>2</sup>.



## Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con M10-B-30 (2,591 mm de espacio entre canales), 16 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 44,65 kPa,
- Sobredimensionamiento: 28,59%.
- Velocidad entre canales: 0,61 m/s.
- Velocidad en ventanas: 0,37 m/s. (X)

2. Con M6-M-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 16 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 55,098 kPa,
- Sobredimensionamiento: -17,03%. (X)
- Velocidad entre canales: 0,80 m/s.
- Velocidad en ventanas: 1,02 m/s.

3. Con M6-M-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 24 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 26,756 kPa,
- Sobredimensionamiento: 1,59%.
- Velocidad entre canales: 0,53 m/s.
- Velocidad en ventanas: 1,02 m/s.

Se trata de un resultado válido, pero se detectó que no se había introducido en el modelo el factor de seguridad por incrustamiento. Al introducir este factor el programa arrojó el resultado de la simulación 4.

4. Con M6-M-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 24 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 34,083 kPa,
- Sobredimensionamiento: -57,30%. (X)
- Velocidad entre canales: 0,61 m/s.



- Velocidad en ventanas: 1,17 m/s.

Al introducir el factor de fouling (factor de seguridad por incrustamiento) el sobredimensionamiento se desplomó y fue necesario seguir buscando una solución.

5. Con M6-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 44 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 65,722 kPa, (X)
- Sobredimensionamiento: -12,34%. (X)
- Velocidad entre canales: 0,58 m/s.
- Velocidad en ventanas: 1,03 m/s.

6. Con M6-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 53 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 47,627 kPa,
- Sobredimensionamiento: 1,84%.
- Velocidad entre canales: 0,48 m/s. (X)
- Velocidad en ventanas: 1,03 m/s.

7. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 31 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 48,855 kPa,
- Sobredimensionamiento: 5,38%.
- Velocidad entre canales: 0,51 m/s.
- Velocidad en ventanas: 1,00 m/s.

Tras realizar siete simulaciones se consigue un resultado que cumple todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.





## Casa de Cultura de Villablino

### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo TL6-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 1,803 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 65,001 mm, y una superficie de placa de 0,260 m<sup>2</sup>.

### Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 21 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 173,28 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: -6,91%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,83 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,73 m/s.
2. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 30 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 92,136 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 26,51%.
  - Velocidad entre canales: 0,58 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,73 m/s
3. Con M6-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 44 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 48,400 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 3,17%.
  - Velocidad entre canales: 0,49 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,85 m/s



4. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 26 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 48,107 kPa.
- Sobredimensionamiento: 14,75%.
- Velocidad entre canales: 0,51 m/s.
- Velocidad en ventanas: 0,90 m/s

Tras realizar cuatro simulaciones se consigue un resultado que cumple todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

### Centro de Salud Valle Laciana

#### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo T20-P-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,896 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 250 mm, y una superficie de placa de 0,892 m<sup>2</sup>.

#### Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con T20-P-30 (2,896 mm de espacio entre canales), 51 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 58,782 kPa. (X)
- Sobredimensionamiento: -25,51%. (X)
- Velocidad entre canales: 0,65 m/s.
- Velocidad en ventanas: 0,83 m/s.



2. Con T20-P-30 (2,896 mm de espacio entre canales), 75 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 29,618 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 1,14%.
  - Velocidad entre canales: 0,44 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,83 m/s.
  
3. Con T20-B-30 (1,905 mm de espacio entre canales), 75 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 101,02 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 16,34%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,66 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,79 m/s.
  
4. Con MX25-B-30 (2,489 mm de espacio entre canales), 51 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 85,340 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 25,57%.
  - Velocidad entre canales: 0,62 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,56 m/s.
  
5. Con MX25-M-30 (3,998 mm de espacio entre canales), 75 canales, 1 paso y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 1,636 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 6,78%.
  - Velocidad entre canales: 0,13 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,56 m/s.
  
6. Con MX25-M-30 (3,998 mm de espacio entre canales), 60 canales, 3 pasos flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 48,421 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 32,29%.
  - Velocidad entre canales: 0,49 m/s. (X)



- Velocidad en ventanas: 0,56 m/s.

Tras realizar seis simulaciones se consigue un resultado que cumple razonablemente todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. Es cierto que la velocidad entre canales no cumple estrictamente la condición de ser mayor de 0,50 m/s, pero tras realizar todas las simulaciones posibles, este es el resultado que más se acerca a cumplir los criterios de diseño. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

### Polideportivo municipal

#### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo M10-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,591 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 100 mm, y una superficie de placa de 0,242 m<sup>2</sup>.

#### Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con M10-B-30 (2,591 mm de espacio entre canales), 46 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 50,087 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: -26,63%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,56 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,72 m/s.
2. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 46 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 58,767 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 44,21%.



- Velocidad entre canales: 0,47 m/s. (X)
- Velocidad en ventanas: 0,63 m/s.

3. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 39 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 48,751 kPa.
- Sobredimensionamiento: 23,59%.
- Velocidad entre canales: 0,50 m/s.
- Velocidad en ventanas: 0,75 m/s.

Tras realizar tres simulaciones se consigue un resultado que cumple todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

### **Colegio Público San Miguel**

#### **Datos de partida**

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo M6- 30, la cual tiene una anchura de canales de 2,007 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 60 mm, y una superficie de placa de 0,260 m<sup>2</sup>.

#### **Resultados**

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con M6-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 53 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 124,130 kPa. (X)
- Sobredimensionamiento: -18,30%. (X)
- Velocidad entre canales: 0,82 m/s.
- Velocidad en ventanas: 1,74 m/s.



2. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 53 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 115,04 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 152,21%.
  - Velocidad entre canales: 0,52 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,52 m/s.
  
3. Con M10-B-30 (2,591 mm de espacio entre canales), 46 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 38,84 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 1,41%.
  - Velocidad entre canales: 0,48 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,62 m/s.
  
4. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 29 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 48,97 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 1,41%.
  - Velocidad entre canales: 0,48 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,52 m/s.
  
5. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 29 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 49,304 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 19,86%.
  - Velocidad entre canales: 0,51 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,53 m/s.

Tras realizar cinco simulaciones se consigue un resultado que cumple todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.



## Edificio Principal del IES Obispo Argüelles (IES A)

### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo M15-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,489 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 150 mm, y una superficie de placa de 0,622 m<sup>2</sup>.

### Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con M15-B-30 (2,489 mm de espacio entre canales), 30 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 57,87 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: -20,34%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,62 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,62 m/s.
2. Con TL15-B-30 (1,905 mm de espacio entre canales), 30 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 180,20 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: 49,29%.
  - Velocidad entre canales: 0,77 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,62 m/s.
3. Con TL15-B-30 (1,905 mm de espacio entre canales), 22 canales, 1 paso y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 35,959 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 3,02%.



- Velocidad entre canales: 0,46 m/s. (X)
- Velocidad en ventanas: 0,53 m/s.

Tras realizar tres simulaciones se consigue un resultado que cumple razonablemente todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. Es cierto que la velocidad entre canales no cumple estrictamente la condición de ser mayor de 0,50 m/s, pero tras realizar todas las simulaciones posibles, este es el resultado que más se acerca a cumplir los criterios de diseño. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

### **Edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles (IES B)**

#### **Datos de partida**

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo M10-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,591 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 100 mm, y una superficie de placa de 0,242 m<sup>2</sup>.

#### **Resultados**

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con M10-B-30 (2,591 mm de espacio entre canales), 50 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 38,54 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 0,94%.
  - Velocidad entre canales: 0,48 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,68 m/s.
2. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 50 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 147,08 kPa. (X)





- Sobredimensionamiento: 125,86%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,60 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 0,56 m/s.
3. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 32 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
- Pérdida de carga: 47,06 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 34,91%.
  - Velocidad entre canales: 0,47 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,56 m/s.
4. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 31 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
- Pérdida de carga: 47,645 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 26,69%.
  - Velocidad entre canales: 0,49 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,59 m/s.

Tras realizar cuatro simulaciones se consigue un resultado que cumple razonablemente todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. Es cierto que la velocidad entre canales no cumple estrictamente la condición de ser mayor de 0,50 m/s, pero tras realizar todas las simulaciones posibles, este es el resultado que más se acerca a cumplir los criterios de diseño. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

Estas simulaciones corresponden la situación estimada, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, también se van a hacer las simulaciones para la situación real (temperaturas de secundario 60°C – 70°C en la entrada y la salida, respectivamente).

1. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 31 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
- Pérdida de carga: 47,621 kPa.
  - Sobredimensionamiento: -33,50%. (X)
  - Velocidad entre canales: 0,49 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,59 m/s.



2. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 48 canales, 4 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 48,420 kPa.
- Sobredimensionamiento: 1,95%.
- Velocidad entre canales: 0,43 m/s. (X)
- Velocidad en ventanas: 0,59 m/s.

Tras realizar dos simulaciones se consigue un resultado que cumple razonablemente todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. Es cierto que la velocidad entre canales no cumple estrictamente la condición de ser mayor de 0,50 m/s, pero tras realizar todas las simulaciones posibles, este es el resultado que más se acerca a cumplir los criterios de diseño. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.

### Gimnasio del IES Obispo Argüelles (IES C)

#### Datos de partida

Los datos de partida han sido reflejados en apartados anteriores exceptuando el tipo de placa en la primera simulación, el cual se especifica a continuación:

- Tipo de placa: Para la primera estimación se considera una placa de Alfa Laval tipo TL10-B-30, la cual tiene una anchura de canales de 2,007 mm, un ángulo de corruga de 30 grados, un diámetro de ventana de 110,000 mm, y una superficie de placa de 0,502 m<sup>2</sup>.

#### Resultados

En este apartado se van a presentar tanto las simulaciones tenidas en cuenta, con sus resultados parciales, como el resultado final. Se marca con una (X) el parámetro de los resultados parciales que no cumple los criterios y que obliga a buscar una solución mejor.

1. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 32 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:

- Pérdida de carga: 30,71 kPa.
- Sobredimensionamiento: 62,87%.
- Velocidad entre canales: 0,37 m/s. (X)
- Velocidad en ventanas: 0,44 m/s. (X)



2. Con TL10-B-30 (2,007 mm de espacio entre canales), 25 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 47,34 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 33,74%.
  - Velocidad entre canales: 0,47 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,44 m/s. (X)
  
3. Con TL10-P-30 (2,997 mm de espacio entre canales), 24 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 35,566 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 19,24%.
  - Velocidad entre canales: 0,42 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 0,39 m/s. (X)
  
4. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 24 canales, 3 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 266,18 kPa. (X)
  - Sobredimensionamiento: -22,03%. (X)
  - Velocidad entre canales: 1,06 m/s.
  - Velocidad en ventanas: 1,06 m/s.
  
5. Con TL6-B-30 (1,803 mm de espacio entre canales), 36 canales, 2 pasos y flujo diagonal se obtienen los siguientes resultados:
  - Pérdida de carga: 41,932 kPa.
  - Sobredimensionamiento: 2,05%.
  - Velocidad entre canales: 0,47 m/s. (X)
  - Velocidad en ventanas: 1,06 m/s.

Tras realizar cinco simulaciones se consigue un resultado que cumple razonablemente todos los criterios de diseño, por lo tanto, se considera adecuado. Es cierto que la velocidad entre canales no cumple estrictamente la condición de ser mayor de 0,50 m/s, pero tras realizar todas las simulaciones posibles, este es el resultado que más se acerca a cumplir los criterios de diseño. En el anexo correspondiente se adjuntan los informes de cálculo extraídos del programa.



#### 7.6.2.6. *Discusión de los resultados del diseño de los intercambiadores*

La ejecución de todas las simulaciones reflejadas en el apartado anterior ha permitido tener un profundo conocimiento de cómo varían las distintas variables de diseño realizando pequeñas modificaciones.

La comprensión de la variación del sobredimensionamiento, la pérdida de carga y las velocidades cuando se varían los parámetros de configuración del intercambiador y los parámetros de las placas, permite tener las herramientas necesarias para poder dimensionar un intercambiador de calor de manera óptima (Wang, L. & Sund 2003).

- Número de placas totales ( $N_c$ ): Cuanto mayor es el número de placas total, sin variar el número de pasos, menor es la pérdida de carga, mayor es el sobredimensionamiento y menor es la velocidad entre placas (ya que tiene más caminos en paralelo por los que ir el flujo).
- Número de pasos ( $P^I$  y  $P^{II}$ ): Cuantos más pasos hay, manteniendo el número de placas totales, aumenta considerablemente la pérdida de carga, aumenta ligeramente el sobredimensionamiento y aumenta considerablemente la velocidad (ya que se ha reducido el número de placas por las que irá el flujo en paralelo).
- La posición relativa de la alimentación de los lados I y II, el lado por el que vayan los fluidos y el tipo de flujo dentro de los canales (vertical o diagonal) ( $\phi$ ,  $Y_h$ ,  $Y_f$ ): no afecta significativamente ni a la pérdida de carga, ni al dimensionamiento, ni a las velocidades.
- Superficie de la placa: Cuanto mayor sea la superficie de la placa, mayor será el sobredimensionamiento ya que habrá una mayor superficie de transferencia y mayor será la pérdida de carga. La velocidad permanece prácticamente invariable.
- Ángulo de las corrugas: Cuanto mayor sea el ángulo de las corrugas, mayor será el sobredimensionamiento y mayor será la pérdida de carga, mientras que la velocidad permanece invariable.
- Anchura de los canales: Cuanto mayor es la anchura de los canales menor será la velocidad dentro del canal, menor será el sobredimensionamiento y menor será la pérdida de carga. Se trata de un parámetro que con variaciones pequeñas tiene repercusiones importantes en los resultados.
- Dimensiones de las ventanas entre placas: Cuanto mayor sea el tamaño de las ventanas entre placas menor será la velocidad del flujo en las mismas.



Se ha comprobado que la metodología descrita en el apartado 7.6.2.4. es válida para encontrar una situación viable en todos los casos estudiados. No obstante, ha sido necesario realizar entre 3 y 5 simulaciones en casi todos los intercambiadores diseñados, por lo tanto, no se puede decir que con la metodología descrita se obtenga directamente un intercambiador óptimo. Se debe calibrar la solución cambiando el número de placas y el número de flujos, aunque en algunas ocasiones también haya sido necesario realizar cambios más importantes, llegando a cambiar el número de pasos e incluso el tipo de placa.

### **7.6.3. Implantación de los equipos en las salas técnicas**

En este apartado se va a indicar la instalación existente en cada una de las salas técnicas y la implantación de los equipos necesarios para poder conectar la red de calor proyectada a los sistemas de calefacción existentes.

Se han realizado visitas técnicas a todas las salas con el fin de identificar los elementos de la instalación existente y poder definir, de esta manera, la mejor opción de conexión e implantación de los equipos geotérmicos. No obstante, no se han obtenido los esquemas de principio de las diferentes salas técnicas. En estos esquemas viene reflejada exactamente la instalación y supone una fuente de información fiable. Al no poder contar con esta información, se han descrito las instalaciones existentes lo más fielmente posible en base a las anotaciones tomadas en las visitas técnicas. Por lo tanto, es posible que, ni la descripción que se hace en este apartado ni los esquemas de principio presentados en el anexo de documentación gráfica, coincidan exactamente con la realidad.

#### **7.6.3.1. Sala técnica del Ayuntamiento de Villablino**

##### **Instalación existente**

La sala técnica del Ayuntamiento de Villablino se trata de una sala de cuadrada de 3,07 x 3,06 metros donde se encuentran una caldera de gasoil de 127,2 kW de potencia instalada, un depósito de gasoil de 3,5 m<sup>3</sup> de capacidad y las conducciones y elementos propios de un circuito de calefacción. Una imagen de la caldera existente en la sala técnica del ayuntamiento se puede ver en la figura nº66.

El agua del circuito se impulsa mediante una bomba de 230W, situada justo encima de la caldera, y que transporta el agua desde la sala técnica hasta los distintos consumidores del



edificio del ayuntamiento a través de conducciones de dos pulgadas y media de diámetro (2 ½”) que no están calorifugadas.

La temperatura que refleja la caldera en el momento de la visita técnica fue de 70°C, igual a la que se va a suministrar con la geotermia.

El circuito de calefacción cuenta con un vaso de expansión de 50 litros para absorber el aumento de presión del agua que se origina en el circuito cuando se calienta el agua.

La instalación no cuenta con un separador hidráulico ni con ningún colector donde se vayan incorporando los circuitos de los distintos consumidores, por lo tanto, se asume que existe un circuito único para todos ellos.

### **Implantación de equipos**

En este apartado se trata de describir la implantación de los equipos en la sala técnica, aunque esta disposición será representada en planos en el anexo correspondiente. La subestación se puede disponer al lado de la caldera en un espacio de 1,72 x 1,80 metros. Las tuberías del circuito de distribución se pueden introducir en la sala a través de la pared Oeste de la sala técnica llegando a conectar directamente con la subestación.

Al no existir un colector de reparto, las conducciones de geotermia se tendrán que conectar directamente a las tuberías del circuito. Es necesario disponer una bomba recirculadora para que pueda introducir el agua del secundario de la subestación en el circuito de calefacción del edificio. Esta bomba se puede disponer entre la subestación y la pared Oeste.

#### ***7.6.3.2. Sala técnica de la Casa de la Cultura de Villablino***

### **Instalación existente**

El acceso de la sala técnica de la Casa de la Cultura de Villablino se encuentra en la calle Serafín Morales, en un callejón situado al Oeste del propio edificio.

La sala se trata de un espacio rectangular de 7,65 x 4,40 metros aproximadamente. En el fondo se encuentra un habitáculo de 1,90 x 1,55 metros que se utiliza de almacén. La sala técnica también se utiliza para almacenar carbón y madera limitando así el espacio útil para los equipos de geotermia.

El sistema de calefacción actual está alimentado por una caldera de carbón antigua de la que no se pudo determinar su potencia nominal puesto que no disponía de placa de



características. Una imagen de la caldera existente en la sala técnica de la Casa de la Cultura de Villablino se puede ver en la figura nº68.

El sistema de distribución de calor dentro de la sala técnica consiste en dos colectores, uno de ida (agua caliente) y otro de retorno (agua fría) de quince (15") pulgadas de longitud y cuatro pulgadas y media (4 ½") de diámetro, aproximadamente. El colector de ida de la instalación se muestra en la figura nº123.



Figura nº123. Colector de impulsión del sistema de calefacción de la Casa de la Cultura.

El colector de ida distribuye a tres circuitos de calefacción independientes de 1 ½" cada uno, mientras que el colector de retorno recoge el agua fría de esos tres circuitos y lo lleva hasta la caldera.

Se desconoce la potencia de la bomba recirculadora del sistema, la cual está situada entre la caldera y el colector de impulsión. En el sistema existe una válvula de tres vías para bypassear a la caldera y un bypass de la bomba recirculadora.

El agua caliente se impulsa a 49°C mientras que el agua de retorno vuelve a unos 50°C aproximadamente.

Por último, se ha observado que el sistema cuenta con un vaso de expansión de 200 litros.

### Implantación de equipos

Para la entrada de las tuberías de geotermia desde el exterior sería necesario reubicar el vaso de expansión existente, ya que este está ubicado entre la caldera y la pared Sur, lo que impide el acceso de las conducciones de la red de calor.



La subestación de intercambio se puede disponer entre la caldera y la pared Sur, donde se encuentra actualmente el vaso de expansión. Se trata de un espacio de 1,90 metros de anchura y hasta 4 metros de longitud que podría albergar tanto la subestación como los vasos de expansión correspondientes, además de permitir los desarrollos del sistema de tuberías necesario.

La conexión de la geotermia al sistema de calefacción actual se debe acometer en los colectores de reparto existentes, procurando no poner los picajes enfrentados a los ya existentes.

Es necesario disponer una bomba que impulse el agua desde la sala técnica hasta el resto del edificio y después pueda devolverla a la subestación de intercambio. Esta bomba se puede disponer en el espacio reservado para la geotermia.

### **7.6.3.3. Sala técnica del Centro de Salud Valle Laciana**

#### **Instalación existente**

Como se ha indicado anteriormente, durante la visita a la sala técnica del Centro de Salud del Valle Laciana no se permitió sacar fotografías, por lo tanto, no se dispone de ningún registro gráfico de la misma más allá de las anotaciones tomadas en el momento de la visita.

La sala técnica cuenta con tres calderas de gasoil, de las cuáles sólo se utilizan dos a la vez, quedando una de reserva. Dos de las calderas tienen una potencia nominal de 515,6 kW mientras que la de reserva tiene una potencia de 319,8 kW.

El sistema de calefacción está dividido en varios circuitos:

- Circuito de calderas: recircula el agua desde las calderas hasta el separador hidráulico y posteriormente lo retorna hasta las calderas. Cada caldera tiene su bombeo consistente en dos bombas en paralelo. El separador hidráulico es vertical y tiene dos entradas y dos salidas, correspondientes a las idas y retornos de los dos circuitos que conecta. El vaso de expansión del circuito de calderas tiene una capacidad de 700 litros.
- Circuito intermedio: conecta el separador hidráulico con los primarios de los intercambiadores de calor. Este circuito está compuesto por tres subcircuitos (calefacción, ACS y bombas de calor). Cada subcircuito cuenta con un sistema de bombeo de dos bombas en paralelo que impulsan el agua caliente hasta los consumidores.





- Circuito de calefacción: el circuito de calefacción tiene como carga principal un intercambiador de calor de 450.000 kcal/h. En este subcircuito se conecta un aljibe de uso industrial.
- Circuito de ACS: el circuito de calefacción tiene como cargas principales dos intercambiadores de calores de 250.000 kcal/h cada uno.
- Circuito de bombas de calor: el circuito de calefacción tiene como cargas principales las bombas de calor situadas en la azotea, y que no se utilizan actualmente, y los radiadores del sótano.
- Circuitos finales: Los circuitos finales impulsan el agua desde los secundarios de los intercambiadores de calor a las cargas térmicas correspondientes.
  - Circuito de calefacción: Cuenta con dos subcircuitos con dos bombas en paralelo cada uno, para abastecer de calefacción el suelo radiante de la planta baja y el suelo radiante de la planta semisótano.
  - Circuito de ACS: Abastece de agua caliente sanitaria a todo el edificio y tiene tres interacumuladores de 1,40 metros de diámetro y 2,00 metros de altura, es decir, de 3000 litros de volumen, a una temperatura de 47°C.

### Implantación de equipos

La sala técnica es un espacio rectangular de 11,40 x 7,10 metros donde se ha aprovechado bien el espacio para instalar los diferentes elementos del sistema térmico.

La solución propuesta consiste en desinstalar la caldera auxiliar e incorporar en el espacio dejado la subestación de intercambio y la bomba de recirculación de la misma. Se trata de una bancada de 1,80 x 1,70 metros suficiente para albergar todos los equipos necesarios.

La introducción de las conducciones puede realizar por la cara Sur de la sala, entre la puerta y la cara Oeste. Sería necesario mover el vaso de expansión de 700 litros existente en esa zona para tener el espacio suficiente.

El sistema de geotermia se debería conectar al sistema existente a través del separador hidráulico vertical que se encuentra en la zona central de la cara Norte.



#### **7.6.3.4. Sala técnica del Polideportivo municipal de Villablino**

##### **Instalación existente**

Actualmente el polideportivo de Villablino cuenta con un sistema mixto de biomasa (pellets) y gasoil, en el que las calderas de gasoil sirven de apoyo al sistema principal de biomasa.

Se trata de un sistema complejo del cual no se ha podido obtener esquemas de principio reales, por lo tanto, la descripción del sistema ha sido estimada a partir de la visita técnica y puede no corresponderse exactamente con la realidad.

Estos dos sistemas se encuentran en salas diferentes pero contiguas conectadas por las conducciones térmicas. En la sala donde se encuentran las calderas de gasoil también se encuentran unas calderas antiguas también de gasoil y cuyas conducciones están conectadas al sistema. En esta misma sala se encuentra un interacumulador de 1,15 m. de diámetro y 2,40 m. de altura, es decir, de 2500 litros de capacidad. Una imagen de esta sala se puede ver en la figura nº71.

En la sala contigua, donde se encuentra la caldera de pellets, se encuentran dos interacumuladores más de 1500 litros cada uno y con una temperatura de 55°C.

Las calderas de gasoil tienen un vaso de expansión del sistema de 8 litros, mientras que el sistema de la caldera de pellets lo tiene de 300 litros.

Tanto la caldera de pellets, como las calderas de gasoil, y las antiguas calderas de gasoil, se conectan a un colector de reparto desde donde se impulsa el agua a las distintas cargas térmicas del polideportivo y a los interacumuladores. Existe también un colector de retorno donde llega el agua fría del sistema de calefacción y ACS.

##### **Implantación de equipos**

La introducción de las conducciones de la red de calor se haría por la sala de las calderas de gasoil, por un espacio adyacente a la puerta de entrada.

Las calderas antiguas de calefacción están en desuso, por lo tanto, se puede utilizar el espacio que ocupan para disponer la subestación de intercambio y la bomba recirculadora necesaria para hacer pasar el agua del circuito de calefacción del cliente por el secundario de la subestación. Se dispondría de un espacio de 2,60 x 1,60 metros más que suficiente para instalar los elementos mencionados.



La conexión del sistema de geotermia con el sistema existente sería el empalme de las conducciones de geotermia con las antiguas conducciones de las calderas de gasoil antiguas, las cuales siguen conectadas al sistema actual.

#### **7.6.3.5. Sala técnica del Colegio Público San Miguel**

##### **Instalación existente**

La sala técnica del Colegio Público San Miguel tiene una doble función, albergar la instalación térmica del edificio y ejercer de carbonera. Se trata de un espacio muy amplio separado por un tabique, aproximadamente a la mitad, que deja un paso de metro y medio aproximadamente y que independiza la carbonera de la sala técnica. El espacio de la sala técnica es rectangular y tiene unas dimensiones aproximadas de 8,80 x 3,60 metros. Una imagen de la sala técnica del Colegio Público San Miguel se puede ver en la figura nº124.



Figura nº124. Sala técnica del Colegio Público San Miguel.

La fuente de calefacción actual es una caldera de carbón de 176,7 kW que se sitúa en aproximadamente en el centro de la sala.



Existen dos colectores de reparto, uno para agua caliente y otro para agua fría que reparten a dos circuitos de tuberías de dos pulgadas (2") cada uno. Estos circuitos son los encargados de llevar el agua caliente desde la sala técnica hasta los consumidores térmicos del colegio y traerla de vuelta a la sala técnica. Cada uno cuenta con una bomba de impulsión de 285 W. El sistema de calefacción tiene un vaso de expansión de 140 litros para absorber los cambios de volumen del líquido al calentarse.

Los colectores de reparto tienen unas dimensiones de veinte pulgadas de longitud y seis de diámetro, como se puede observar en la figura nº125.



Figura nº125. Colector de impulsión del sistema de calefacción del Colegio Público San Miguel.

Ninguno de los elementos de la sala térmica se encuentra calorifugado.

### Implantación de equipos

Las conducciones de geotermia entrarían en la sala por el patio trasero del colegio. Se podría utilizar parte del espacio destinado para la carbonera para el acceso de las tuberías. Una vez dentro de la sala, las conducciones se harían llegar hasta el espacio reservado para la instalación geotérmica.

Este espacio se sitúa al lado del tabique de separación entre la carbonera y la sala técnica. Las dimensiones del mismo serían de 3,60 x 3,00 metros para dejar espacio suficiente para el trasiego de carbón entre la carbonera y la salida.

La dimensión más restrictiva de la sala es la altura de la misma con apenas 1,90 metros.



### 7.6.3.6. Sala técnica del edificio principal del IES Obispo Argüelles

#### Instalación existente

En este apartado se presenta la instalación térmica existente en el edificio principal del IES Obispo Argüelles.

El sistema está alimentado por una caldera de gasoil de 393 kW de potencia que proporciona calefacción a todo el edificio. Desde la caldera se impulsa el agua hasta un separador hidráulico que distribuye el caudal a cuatro circuitos. De estos circuitos existe uno redundante, cuyo objeto es mantener el abastecimiento en caso de que alguno de los otros quede en desuso por mantenimiento o por avería. Por lo tanto, el sistema de calefacción tiene tres subcircuitos bautizados como (Oeste 1, Norte 2, Sur 3). En la figura nº126 se muestran los colectores de reparto, de ida y de retorno, así como las bombas de impulsión de la sala técnica del edificio principal del IES Obispo Argüelles.

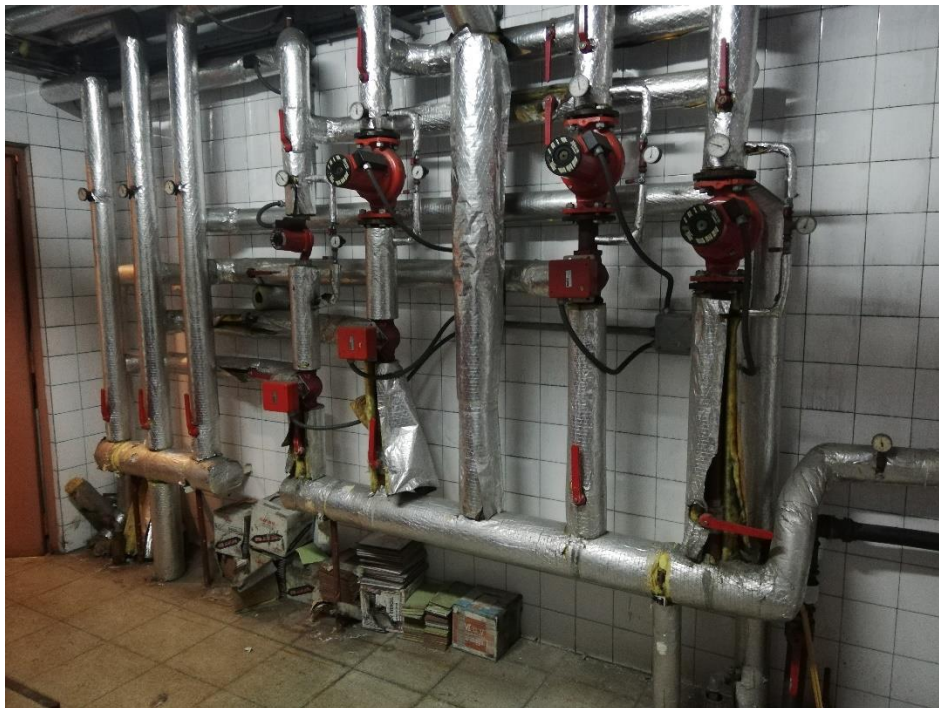


Figura nº126. Colectores de la sala técnica del edificio principal del IES.

El retorno de los circuitos llega a un colector de reparto que después conduce las aguas frías de nuevo hasta las calderas.

El agua sale de la caldera a una temperatura de 60°C y tras pasar por los distintos consumidores térmicos del edificio vuelve a la sala técnica con una temperatura de 50°C.



El diámetro de las conducciones del sistema son dos pulgadas y media. Las dimensiones del colector de reparto son cinco pulgadas de diámetro y casi dos metros de longitud.

### **Implantación de equipos**

La sala técnica tiene una geometría cuadrangular de 4,60 x 4,50 metros con dos accesos en esquinas opuestas de la sala.

La introducción de las tuberías geotérmicas se haría por la cara norte de la sala, la cual da a la fachada norte del edificio. En ese espacio, junto al colector de impulsión existente y donde se encuentra actualmente el vaso de expansión, se puede situar la subestación de intercambio y la bomba recirculadora. Éste tiene unas dimensiones de 2,90 x 1,50 suficientes para instalar los equipos descritos.

La conexión del sistema geotérmico con el sistema de calefacción existente debería ejecutarse en los colectores de reparto, ejecutando los picajes de manera que no queden enfrentados con las entradas y salidas ya existentes en los mismos.

#### ***7.6.3.7. Sala técnica del edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles***

### **Instalación existente**

La caldera del edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles se alimenta con gasoil y tiene 192 kW de potencia. Se sitúa en el centro de la sala y calienta el agua hasta los 70°C. El agua caliente se lleva hasta un colector de reparto donde distribuye a cuatro circuitos (tres principales y uno redundante), cada uno con su bomba de impulsión.

Los tres circuitos están bautizados como Norte, Sur y Buhardilla (este último se añadió a posteriori) y vuelven a la sala técnica a través de las conducciones de retorno que se juntan en otro colector. Desde el colector, el agua fría pasa a la caldera para subir su temperatura desde los 50° hasta los 70°C antes comentados.

En la figura nº127 se muestran los colectores de reparto, de ida y de retorno, así como las bombas de impulsión de la sala técnica del edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles.



Figura nº127. Colectores térmicos del edificio de la entrada del IES Obispo Argüelles.

La instalación cuenta con un vaso de expansión de 140 litros de capacidad.

### Implantación de equipos

Las dimensiones de la sala técnica del edificio situado a la entrada del Instituto de Educación Secundaria Obispo Argüelles son las más restrictivas de todas las salas técnicas visitadas. Se trata de una sala rectangular de 5,65 x 3,05 metros que en una esquina tiene un habitáculo de 1,50 x 1,35 metros.

El espacio en la sala está muy aprovechado por la instalación existente dejando poco espacio para la instalación de geotermia.

La única zona donde se podría implantar la subestación de intercambio sería entre la caldera y la pared que da al exterior, en un espacio de 2,00 x 1,00 metros. El acceso de las tuberías geotérmicas también sería por esa misma zona, probablemente al otro lado del conducto de extracción de humos de la caldera.



### 7.6.3.8. Sala técnica del gimnasio del IES Obispo Argüelles

#### Instalación existente

El sistema de calefacción existente cuenta con dos calderas de 63,8 kW de potencia nominal que alimentan los aerotermos, responsables de caldear el pabellón, los radiadores de los vestuarios y un depósito para ACS. En funcionamiento normal se tiene una caldera activa y la otra de reserva.

Existen dos colectores independientes, uno de ida (con agua caliente) y otro de retorno (con agua fría). Las calderas tributan a los colectores y desde los colectores se impulsa el agua a través de tres circuitos (aerotermos, radiadores, ACS). Las lecturas vistas en campo indican que la temperatura de impulsión de uno de los circuitos es de 80°C y de 45°C en el otro, no pudiendo ver las temperaturas de impulsión en el circuito de ACS porque no estaba funcionando. Las temperaturas de retorno medidas fueron 70°C y 40°C respectivamente.

En la figura nº128 se muestran los colectores de reparto, de ida y de retorno, así como las bombas de impulsión de la sala técnica del gimnasio del IES Obispo Argüelles.



Figura nº128. Colectores del sistema térmico del gimnasio del IES.

La instalación cuenta con dos vasos de expansión de 35 litros cada uno.

#### Implantación de equipos

La sala técnica tiene unas dimensiones de 4,75 x 3,80 metros que permiten la instalación de los equipos de geotermia. En concreto, el lugar idóneo para situar la subestación de





intercambio y la bomba recirculadora es entre las calderas y los colectores. Entre ellos hay un espacio de 2,50 metros suficiente para instalar los equipos geotérmicos.

La entrada de las conducciones geotérmicas se hace por la fachada Este de la sala, de manera que las conducciones puedan conectarse directamente a la subestación.

El sistema de nueva construcción deberá conectarse al existente a través de los colectores de ida y de retorno procurando que ninguno de los picajes quede enfrentado.

### 7.7. ESTUDIO ECONÓMICO

En el Anexo 4 se detalla el cálculo del VAN (ver tabla final) teniendo en cuenta 25 años de vida útil. Este VAN resulta ser negativo, por lo tanto, la inversión no resulta rentable económicamente. Para mejorar esta situación se van a analizar pormenorizadamente los factores que afectan a este valor.

En primer lugar, se observa que la inversión inicial es muy elevada. El principal concepto que eleva esta inversión es el de conducciones y zanjas. Este valor aumenta con la distancia de los clientes a la sala de generación y con el diámetro de las conducciones.

Para reducir este coste se deben priorizar clientes que se encuentren a menos de 2 km de distancia de la sala de generación, tal y como se propone en Menéndez et al. (Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Fernández-Oro, J. M.; Loredó, J. & Díaz-Aguado 2020). Esto afectará a su vez al diámetro de las conducciones porque se reducirán las pérdidas de carga y hará posible utilizar diámetros más pequeños. La principal razón por la que se han utilizado diámetros más grandes en la red de calor de Villablino es, precisamente, para minimizar las pérdidas de carga y que llegue caudal a todos los clientes.

Otro aspecto a tener en cuenta es la escasa diferencia entre los costes de operación y mantenimiento y los beneficios que produce la venta de energía térmica. Como hemos comentado anteriormente esto depende mucho de las negociaciones finales con los clientes; sin embargo, se ha observado que los márgenes son escasos. En el primer año se produce una diferencia de 46.762,36 € mientras que en el año 25 de la inversión la diferencia es tan solo de 7.374,39 € teniendo en cuenta un valor de tasa de descuento del 8%. Esto implica que en los 25 años de explotación los beneficios obtenidos son 539.111,92 €, muy por debajo de la inversión inicial, lo que implica que el VAN resulte negativo.



Será necesario reducir los costes de operación y mantenimiento al máximo, y aumentar los márgenes de beneficio por la venta de la energía mediante primas que favorezcan este tipo de energías limpias y renovables.

Lo que parece claro es que la red de calor de Villablino planteada y dimensionada en este trabajo necesitaría algún tipo de incentivo por parte de las instituciones públicas para poder ser económicamente rentable.

Estos incentivos pueden venir dados de dos maneras. La primera manera sería en forma de primas al consumo de este tipo de energías limpias y renovables que hagan que mejoren los márgenes de beneficio de la explotación del sistema. La segunda manera puede llegar a través de subvenciones que reduzcan en gran medida la inversión inicial a acometer.



## CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES



## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zona de estudio (comarca de Lacia) ha tenido, históricamente, un desarrollo económico muy polarizado a la industria extractiva de carbón. El abandono de la actividad minera, completado durante los primeros años del siglo XXI ha generado un importante declive demográfico y social, por lo que resultan de gran interés práctico las iniciativas con potencialidad de crear actividad económica. El abandono de las operaciones extractivas también ha supuesto el cese del bombeo del agua subterránea, con la consiguiente inundación de los huecos mineros y la aparición de flujos de agua de mina en los puntos donde el nuevo nivel piezométrico encuentra una conexión con el exterior. En este contexto, el presente trabajo es una propuesta de creación de valor a partir de un recurso actualmente sin uso: el agua de las minas. No existen, hasta el momento, estudios científicos (incluso técnicos) que planteen, ni siquiera de forma indirecta, el aprovechamiento de la extraordinaria infraestructura minera existente.

Se ha realizado un inventario de los puntos en los que aparece, en superficie, el drenaje de los huecos mineros, midiéndose diversos parámetros físico-químicos a lo largo de un año hidrológico. Se trata de aguas que presentan temperaturas entre 8,7 y 15,5°C, y con poca variabilidad estacional. Los drenajes que presentan temperaturas más elevadas, entre 12,5 y 15,5°C, se corresponden con el agua del grupo minero “Calderón” (minería de montaña y subterránea) y la del “transversal de Villablino”. El valor del pH es, en todos los casos, circumneutral, restringiéndose al intervalo 6,47-7,55, con lo que se puede concluir la inexistencia de aguas ácidas de mina, a pesar de la ausencia de niveles carbonatados en la serie carbonífera.

Los valores obtenidos de turbidez son bajos o muy bajos, indicando un escaso contenido, salvo casos muy puntuales en los drenajes del grupo Carrasconte, en sólidos en suspensión. Los valores de la conductividad eléctrica son más variables, resultando moderadamente conductoras las aguas del grupo Calderón (mina de montaña y subterránea) y del grupo Carrasconte (mina de montaña). Los valores de dureza, expresados en mg/l equivalentes de CaCO<sub>3</sub> evidencian que se trata de aguas duras, a excepción de las de los grupos Calderón y Carrasconte (que serían muy duras) y la de la mina Paulina (moderadamente dura). Son aguas con una alcalinidad que varía entre fuerte (grupo Lumajo, mina Paulina y grupo Bolsada en Caboalles de abajo) y muy fuerte (el resto).

Desde el punto de vista de su composición química, se trata de aguas de tendencia cálcica – en algún caso, magnésica- con contenidos a nivel ultratraza de diversos metales de transición,



y con Fe y Sr en el rango de elementos traza en algunas de las muestras. Únicamente se superan los límites establecidos en el RD 140/2003 en agua de consumo humano para Mn y Fe y, en una única muestra (grupo Carrasconte), para Pb.

Los índices de Langelier y de Lyznar, considerados de forma conjunta, indican que, en la mayor parte de los casos, se trata de aguas poco incrustantes y poco corrosivas, aunque con una mayor tendencia corrosiva.

Considerando los potenciales aprovechamientos energéticos de estas aguas (geotermia, tanto en circuito abierto como en circuito cerrado, e hidroeléctrica, mediante salto o con microturbinas) y sometiéndolos a una jerarquización mediante modelos multicriterio (AHP) considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, se obtiene como opción más ventajosa la geotermia en circuito abierto, seguida del aprovechamiento hidroeléctrico mediante microturbinas.

Una vez definida la alternativa óptima de aprovechamiento energético, y aplicando nuevamente modelos multicriterio que contemplan la temperatura del agua de mina y su necesidad de tratamiento, la inversión estimada, la potencial población abastecida, los posibles clientes y la capacidad de ampliación, el drenaje de las labores de montaña del grupo Calderón resulta la alternativa más atractiva, seguida de cerca por el agua de mina del transversal de Villablino. Para el primer caso se ha determinado la disponibilidad de un caudal medio de 51,17 l/s con una temperatura media de 14,4°C.

Como aplicación práctica de lo desarrollado en los capítulos 4, 5 y 6, se ha realizado el diseño completo de una red de calor en el núcleo urbano de Villablino, que incluye un estudio de demanda sobre determinados edificios públicos (Ayuntamiento de Villablino, la Casa de la Cultura, el Centro de Salud Valle Laciana, el polideportivo municipal, el Colegio Público San Miguel y el IES Obispo Argüelles) que totalizan un consumo de 2.426,78 kWh en hora punta (día de invierno a las 7:00 de la mañana). Dado que no existe obligación reglamentaria de cubrir la totalidad de las horas de consumo, se propone un sistema que proporcione 1.900 kWh, que satisface la demanda total durante más del 98% del tiempo. Para cubrir el desajuste estacional entre el caudal de agua de mina disponible y las necesidades del sistema resulta necesaria, en el escenario analizado, la disposición de una balsa de acumulación de agua que pueda regular el aporte. En este supuesto, el circuito de distribución tendría una longitud de 10.885,82 m (computando ida y retorno), resultando la optimización del diámetro de las tuberías un factor crítico en el precio final.



En términos globales, el sistema propuesto, con todos sus elementos y las debidas conexiones a los equipos existentes en cada uno de los edificios considerados tiene un coste de implantación de 6.136.862,20 €. El análisis de la rentabilidad de la inversión mediante el VAN a 25 años arroja un valor negativo de 5.597.750,28 €. Esto indica que la actuación, en los términos en que ha sido propuesta, no es rentable económicamente por sí sola y necesitaría de subvenciones u otro tipo de incentivos para poder ser considerada por un promotor.

Una línea de investigación futura que se considera de interés especial y sería una continuación natural de este trabajo consistiría en el análisis de la hibridación de la red de calor de geotermia dimensionada con otro tipo de energías renovables como pueden ser la biomasa o la solar. Una de las ventajas que tiene la localización elegida en el estudio de alternativas es la existencia de un amplio espacio para implantar otros tipos de energía renovable.

Por otra parte, y profundizando en el conocimiento de las posibilidades del agua de mina, se deberían investigar las posibilidades geotérmicas del agua subterránea almacenada en el pozo Calderón, a profundidades crecientes.

Finalmente, convendría llevar a cabo un estudio detallado de una hipotética red de calor aprovechando los drenajes del transversal de Villablino: si bien su temperatura y caudal son algo inferiores a los citados para el grupo Calderón, planteando una menor demanda y considerando su cercanía al núcleo urbano, se podría lograr una rentabilidad más atractiva que la determinada para el supuesto estudiado.



## CAPÍTULO IX. REFERENCIAS



## 9. REFERENCIAS

- AEMET. 2019. "Situación de Las Estaciones Meteorológicas de AEMET." 2019. <https://datosclima.es/Aemethistorico/Estaciones.php>.
- Agrawal, V. & Jagetia, M. 1997. "Hydrogeochemical Assessment of Groundwater Quality in Udaipur City, Rajasthan, India." In *Proceedings on National Conference on Dimension of Environmental Stress in India*, 151–54.
- Ajah, A.N., Patil, A.C., Herder, P.M. & Grievink, J. 2007. "Integrated Conceptual Design of a Robust and Reliable Waste-Heat District Heating System." *Applied Thermal Engineering* 27: 1158–64. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.039>.
- Akcil, A. & Koldas, S. 2006. "Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies." *Journal of Cleaner Production* 14: 1139–45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>.
- Al-Haj, H. 2012. "Fouling in Heat Exchangers." *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 3*. <https://doi.org/10.5772/46462>.
- Alcaraz, F.J. 2003. "El Carbonífero Del Norte de León: Un Paraíso Para El Buscador de Fósiles de Plantas." *Geologías. Eubacteria.*, 1–5.
- Alfa-Laval. 2005. "Spiral Heat Exchangers, Industrial/Application Brochure," [www.alfalaval.com](http://www.alfalaval.com).
- Almau, C. 2012. "Metodología Para La Descontaminación de Aguas Procedentes de Lavaderos de Instalaciones Mineras." Universidad Politécnica de Cartagena.
- Alonso. 2013. "Carbominsa Proyecta Usar El Agua de Dos Minas Cerradas Para Generar Electricidad." *El Diario de León*, 2013. <https://www.diariodeleon.es/articulo/bierzo/carbominsa-proyecta-usar-agua-minas-cerradas-generar-electricidad/201308200400001370411.amp.html>.
- Alonso, E. 1995. *Atlas Del Medio Natural de La Provincia de León. Instituto Tecnológico GeoMinero de España*.
- Alvarado, R., Niemann, A. & Schwanenberg, D. 2013. "Concepts for Pumped-Storage Hydroelectricity Using Underground Coal Mines." *2013 IAHR Congress, Tsinghua University Press, Beijing*.
- Andrés, C., Ordóñez, A. & Álvarez, R. 2015. "Hydraulic and Thermal Modelling of an Underground Mining Reservoir." *Mine Water and the Environment* 36 (1): 24–33.





- <https://doi.org/10.1007/s10230-015-0365-1>.
- Andresen, B. & Gordon, J.M. 1992. "Optimal Heating and Cooling Strategies for Heat Exchanger Design for Heat Exchanger Design." *Journal of Applied Physics* 71 (76). <https://doi.org/10.1063/1.350649>.
- Aneke, M. & Wang, M. 2016. "Energy Storage Technologies and Real Life Applications – A State of the Art Review." *Applied Energy* 179: 350–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>.
- Arce, E.M., Saavedra, Á., Míguez, J.L. & Granada, E. 2015. "The Use of Grey-Based Methods in Multi-Criteria Decision Analysis for the Evaluation of Sustainable Energy Systems : A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47: 924–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.010>.
- Arias, J. 2005. "Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements." *Doctoral Thesis. KTH Industrial Engineering and Management*.
- Arroyo, J.M. 2012. "Botella de Equilibrado Hidráulico, Pirolito O Aguja Hidráulica," <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2012/03/botella-de-equilibrado-hidraulico-pirolito-o-aguja-hidraulica.pdf>.
- Arsenyeva, O.P., Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O. & Khavin, G.L. 2011. "Optimal Design of Plate-and-Frame Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Process Industries." *Energy* 36 (8): 4588–98. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.022>.
- Asadi, M., & Ramin, R. 2013. "Investigation into Fouling Factor in Compact Heat Exchanger." *International Journal of Innovation and Applied Studies* 2 (3): 238–49. <http://www.issr-journals.org/ijias/abstract.php?article=IJIAS-13-015-01>.
- Atekwana, E.A., Rowe, R.S., Werkema, D.D. & Legall, F.D. 2004. "The Relationship of Total Dissolved Solids Measurements to Bulk Electrical Conductivity in an Aquifer Contaminated with Hydrocarbon." *Journal of Applied Geophysics* 56 (4): 281–94. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.003>.
- Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A. & Parker, K. 2016. "The Design and Evaluation of an Open Loop Ground Source Heat Pump Operating in an Ochre-Rich Coal Mine Water Environment." *International Journal of Coal Geology* 164: 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.015>.
- Auer, J. & Keil, J. 2012. "State-of-the-Art Electricity Storage Systems." *Deutsche Bank Research*.



- Ayers, R.S. & Wascot, D.W. 1985. "Water Quality for Irrigation. #20, Rev 1." *FAO Irrigation and Drainage Paper, FAO, Rome*. 20 (1).
- Ayuntamiento, V. 2018. "Historia Y Economía Lacia." *Web Del Ayuntamiento de Villablino*. <https://www.aytovillablino.com/informacion/historia-y-economia-lacia/#1559739166586-2d3ce923-2780>.
- Bani, A. & Peschel, J. 2012. "Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience." *Heat Exchangers - Basics Design Applications*. <https://doi.org/10.5772/34026>.
- Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A. & Burnside, N. 2017. "Water from Abandoned Mines as a Heat Source : Practical Experiences of Open- and Closed-Loop Strategies , United Kingdom." *Sustainable Water Resources Management* 0 (0): 0. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0094-7>.
- Banks, D., Pumar, A. F. & Watson, I. 2009. "The Operational Performance of Scottish Minewater-Based Ground Source Heat Pump Systems." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 42 (3): 347–57. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-081>.
- Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop, C. 2004. "Heat Pumps as a Tool for Energy Recovery from Mining Wastes." *Geological Society, London, Special Publications* 236 (1): 499–513. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.236.01.27>.
- Banks, D., Younger, P. L., Arnesen, R.T., Iversen, E. R. & Banks, S. B. 1997. "Mine Water Chemistry: The Good, the Bad and the Ugly." *Environmental Geology*, no. 32: 157–74.
- Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J. & Green, C. 2018. "Large-Scale Mine Water Geothermal Applications with Abandoned Mines." In *Proceedings of Geoshangai 2018*, 1:685–95. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-0017-2\\_69](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-0017-2_69).
- Beccali, M., Cellura, M. & Mistretta, M. 2003. "Decision-Making in Energy Planning. Application of the Electre Method at Regional Level for the Diffusion of Renewable Energy Technology." *Renewable Energy* 28 (13): 2063–87. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00102-2).
- Bell, F.G. & Donnelly, L.J. 2006. *Mining and Its Impact on the Environment*. Taylor & Francis, New York.
- Benayoun, R., Roy, B. & Sussman, N. 1966. "Manual de Reference Du Programme Electre." *Paris: Direction Scientifiques SEMA.*, 1966.
- Bertani, R. 2005. "World Geothermal Power Generation in the Period 2001-2005."



- Geothermics* 34: 651–90.
- Berumen, S.A. & Llamazares, R. 2014. “Economic Development and Viability Firms in European Mining Regions.” *Regional and Sectoral Economic Studies* 14 (1): 33–46.
- Berumen, S.A. 2016. “Nota Metodológica Sobre El Impacto de La Crisis Económica En Una Zona Minera Y Aplicación a Un Caso.” *Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research* 34: 125–36.
- Bhatt, D.J., Priyanka, M.J. &, and J.S. Prakash. 2014. “Review Paper on Analysis of Heat Transfer in Shell and Tube Type Heat Exchangers.” *International Journal for Scientific Research & Development* 2 (6): 446–53.
- Bhavani, M., Kanthimathi, T., Surya, A. & Nagendra, A. 2017. “Comparison of Mass Rate of Flow of Cold Fluid in Shell and Tube and in Plate Heat Exchanger.” *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 116 (5): 105–9.
- Boahen, S., Lee, K.H., Cho, S. & Choi J.M. 2017. “A Study on the Evaluation of the Annual Energy Consumption for a Geothermal Heat Pump System with Open Loop and Closed Loop Ground Heat Exchangers.” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 25 (3): 1–13. <https://doi.org/10.1142/S2010132517500249>.
- Boissavy, C. 2015. “Cost and Return on Investment for Geothermal Heat Pump Systems in France.” In *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*.
- Bose, D. & Bose, B. 1995. “Evaluation of Alternatives for a Water Project Using a Multiobjective Decision Matrix.” *Water International* 20 (4): 169–75. <https://doi.org/10.1080/02508069508686471>.
- Bouvier, M.E., Pérez, A. & Muniz, P. 2013. “A Simple Home-Made Turbidimeter (HMT) for Turbidity Measurements Using *Hyalella Curvispina* Shoemaker 1942 (Crustacea: Amphipoda) for the Assessment of Environmental Quality of Coastal Waters.” *Brazilian Journal of Oceanography* 61 (3): 201–6. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592013000300005>.
- Braat K.B., Van-Lohuizen, H.P.S. & De-Haan J.F. 1985. “Underground Pumped Hydro-Storage Project for the Netherlands.” *Tunnels Tunneling* 17 (11): 19–22.
- Brans, J.P., Vincke, P.H & Mareschal, B. 1986. “How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE.” *European Journal of Operations Research* 24: 228–38.
- Brown, M., Barley, B. & Wood, H. 2002. “Minewater Treatment: Technology, Application and



- Policy. IWA Publishing, Dorchester.” In *IWA Publishing, Dorchester*.
- Calabuig, L., Purroy, F. & Arribas, J. 2004. “La Trama Biológica.” In *Ríos de León. Arquitectos Del Paisaje.*, 79–233. Edileasa.
- Canal de Isabel II. 2012. “Normas Para Redes de Abastecimiento Del Canal de Isabel II.”
- Carretero-León, M<sup>a</sup> I. & Pozo-Rodríguez, M. 2007. *Mineralogía Aplicada*. Thomson Editores.
- Carrier Air Conditioning Company. 1965. “Handbook of Air Conditioning System Design.” *McGraw-Hill Book Company, New York*.
- Castro, Manuel. 2001. “El Valor Actual Neto (VAN) Como Criterio Fundamental de Evaluación de Negocios. (Spanish).” *Economía Y Desarrollo* 128 (1): 180–94. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=18810110&lang=es&site=ehost-live>.
- CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. 1987. “Canadian Water Quality Guidelines, Water Quality Branch, Inland Waters Directorate.”
- Cedar-Lake-Venture. 2018. “El Clima Promedio En Villablino.” 2018. <https://es.weatherspark.com/y/33704/Clima-promedio-en-Villablino-España-durante-todo-el-año>.
- Chaghooshi, A.J., Fathi, M.R. & Kasherf, M. 2012. “Integration of Fuzzy Shannon’s Entropy with Fuzzy TOPSIS for Industrial Robotic System Selection.” *Journal of Industrial Engineering Management* 5 (1): 102–14.
- Chazarra, A., Flórez, E., Peraza, B., Tohá, T., Lorenzo, B., Criado, E., Moreno, J.V., Romero, R. & Botey, R. 2018. *MAPAS CLIMÁTICOS DE ESPAÑA (1981-2010) Y ETo (1996-2016)*. *Catálogo de Publicaciones de La Administración General Del Estado. Ministerio Para La Transición Ecológica. Agencia Estatal de Meteorología*.
- Chisholm, D. 1980. “Developments in Heat Exchanger Technology.” *Applied Science Publishers, London*.
- CHM-S. 2010. “Capítulo 2. Descripción General de La Demarcación.” In *Proyecto de Plan Hidrológico de La Demarcación Hidrográfica Del Miño-Sil*., 148.
- Cho, Y.I., Choi, B.G. & Bennat, J. 1998. “Electronic Anti-Fouling Technology to Mitigate Precipitation Fouling in Plate-and-Frame Heat Exchangers.” *International Journal of Heat Mass Transfer* 41: 2565–71.
- Cho, Y.I., Lee, S.H. & Kim, W. 2003. “Physical Water Treatment for the Mitigation of Mineral



- Fouling in Cooling-Tower Water Applications.” *Engineering Conferences International*, 346–57.
- Cho, Y.I. & Mclachlan, D. 2008. “Physical Water Treatment for Cooling.” *Cooling Technology Institute Annual Conference*.
- Cho, Y.I. 2002. “Efficiency of Physical Water Treatment in Controlling Calcium Scale Accumulation in Recirculating Open Cooling Water System.” *ASHRAE Research Project* 115 (TRP).
- Choi, D.J., You, S.J. & Kim, J.G. 2002. “Development of an Environmentally Safe Corrosion, Scale, and Microorganism Inhibitor for Open Recirculating Cooling Systems.” *Materials Science and Engineering* 335 (1–2): 228–36. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01928-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01928-1).
- Chou, J.S. & Ongkowijoyo, C.S. 2014. “Risk-Based Group Decision Making Regarding Renewable Energy Schemes Using a Stochastic Graphical Matrix Model.” *Automation in Construction* 37: 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.010>.
- Choudhury, M.R., Hsieh, M.K., Vidic, R.D. & Dzombak, D.A. 2012. “Corrosion Management in Power Plant Cooling Systems Using Tertiary-Treated Municipal Wastewater as Makeup Water.” *Corrosion Science* 61: 231–41. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.04.042>.
- Chramcov, B. 2010. “Heat Demand Forecasting for Concrete District Heating System.” *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* 4 (4): 231–39.
- Clarke, L.B. 1995. *Coal Mining and Water Quality*. IEA Coal Research.
- Clauser, C. & Ewert, M. 2018. “The Renewables Cost Challenge: Levelized Cost of Geothermal Electric Energy Compared to Other Sources of Primary Energy – Review and Case Study.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 3683–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.095>.
- Corrales, I. & Peláez, J.R. 1966. “La Sedimentacion Marginal En La Cuenca Estefaniense de Villablino (León).” *Breve Geología Astúrica* 1–4: 33–54.
- Corrales, I. 1971. “La Sedimentacion Durante El Estefaniense B-C En Cangas de Narcea, Rengos Y Villablino (NW de España). Tesis Doctoral.” *Trabajos de Geología* 3: 69–73.
- Costa, A.L.H. & Queiroz, Eduardo E.M. 2008. “Design Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchangers.” *Applied Thermal Engineering* 28: 1798–1805.



- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.009>.
- Costa, M. C., Martins, M., Jesus, C. & Duarte, J. C. 2008. "Treatment of Acid Mine Drainage by Sulphate-Reducing Bacteria Using Low Cost Matrices." *Water, Air, and Soil Pollution* 189 (1–4): 149–62. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9563-1>.
- Cravotta, C. 2010. "Abandoned Mine Drainage in the Swatara Creek Basin, Southern Anthracite Coalfield, Pennsylvania, USA: 2. Performance of Treatment Systems." *Mine Water and the Environment* 29 (3): 200–216. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0113-5>.
- Curtis, R., Lund, J., Sanner, B., Rybach, L. & Hellstr, G. 2005. "Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere : Current Worldwide Activity." In *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*, 24–29.
- Dalla-Rosa, A., Li, H. & Svendsen, S. 2011. "Method for Optimal Design of Pipes for Low-Energy District Heating , with Focus on Heat Losses." *Energy* 36: 2407–18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.024>.
- Davis, M.W., Ieee, F., Gifford, A.H., Asme, M. & Krupa, T.J. 1999. "Microturbines - an Economic and Reliability Evaluation for Commercial, Residential, and Remote Load Applications." *IEEE Transactions on Power Systems* 14 (4): 1556–62.
- Deane, J. P., Ó Gallachóir, B. P. & McKeogh, E. J. 2010. "Techno-Economic Review of Existing and New Pumped Hydro Energy Storage Plant." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (4): 1293–1302. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.015>.
- Dehghandokht, M., Mesbah G.K., and S. Fartaj, A. & Sanaye. 2011. "Flow and Heat Transfer Characteristics of Water and Ethylene Glycol-Water in a Multi-Port Serpentine Meso-Channel Heat Exchanger." *International Journal of Thermal Sciences* 50 (8): 1615–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.004>.
- Dehkordi, S.E. & Schincariol, R.A. 2014. "Effect of Thermal-Hydrogeological and Borehole Heat Exchanger Properties on Performance and Impact of Vertical Closed-Loop Geothermal Heat Pump Systems." *Hydrogeology Journal* 22: 189–203. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1060-6>.
- Demchak, J., Morrow, T. & Skousen, J. 2001. "Treatment of Acid Mine Drainage by Four Vertical Flow Wetlands in Pennsylvania." *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 1: 71–80. <https://doi.org/10.1144/geochem.1.1.71>.
- Devesa, J. 2015. "Auditoría Energética de Las Instalaciones Del Instituto de Enseñanza Secundaria Obligatoria Obispo Argüelles.," 2015.



- DeZuane, J. 1997. "Handbook of Drinking Water Quality." (2nd Ed.). *John Wiley and Sons.*, ISBN: 978-0-471-28789-6.
- Dhadwad, A., Balekar, A. & Nagrale, P. 2014. "Literature Review on Blade Design of Hydro-Microturbines." *International Journal of Scientific & Engineering Research* 5 (12): 72–75.
- Díez, F.A. 1982. "El Valle Laciana." S.I. : *Alsa, 1982 Imp.*, ISBN: 8430072004.
- Dimamex. 2017. "Catálogo Técnico de Tanques de Doble Pared En PRFV 2017," <http://www.dimamex.com/depositos-de-doble-pared-en>.
- Domergue, C. 1972. "Las Minas de Oro Romanas de La Provincia de León: Razones de Una Excavación Arqueológica."
- Doneen, L.D. 1964. "Notes on Water Quality in Agriculture." *Water Science and Engineering. Department of Water Sciences and Engineering. University of California.* 4001.
- Dowlatabadi, H. & Hanova, J. 2007. "Strategic GHG Reduction through the Use of Ground Source Heat Pump Technology. *Environ Res Lett* 2007;2:1 – 8." *Environmental Research Letters* 2: 1–8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/044001>.
- Durvey, V.S., Sharma, L.L., Saini, V.P. & Sharma, B.K. 1991. *Handbook on the Methodology of Water Quality Assessment. Rajasthan Agriculture University.*
- Eaton, F.M. 1950. "Significance of Carbonates in Irrigation Waters." *Soil Science* 39: 123–33.
- Edstrom. 1998. "Scale Forming Tendency of Water." *Estrom Industries*, [www.edstrom.com/lab/bulletins/mi4710.thm](http://www.edstrom.com/lab/bulletins/mi4710.thm).
- Edwards, J.E. 2008. "Design and Rating Shell and Tube Heat Exchangers." *Chemical Engineering*, 30.
- Elliot, P., Ragusa, S. & Catecheside, D. 1998. "Growth of Sulphur Reducing Bacteria under Acidic Conditions in an Upload Anaerobic Bioreactor as a Treatment System for Acid Mine Drainage." *Water Research* 32 (12): 3724–30.
- Embalses.net. 2020. "Datos Del Embalse de Las Rozas," <https://www.embalses.net/pantano-758-las-rozas.htm>.
- Europeo, Parlamento. 2018. "Directiva (UE) 2018/2001 Del Parlamento Europeo Y Del Consejo de 11 de Diciembre de 2018 Relativa Al Fomento Del Uso de Energía Procedente de Fuentes Renovables." *Diario Oficial de La Unión Europea*.
- Evans, A., Strezov, V. & Evans, T.J. 2009. "Assessment of Sustainability Indicators for



- Renewable Energy Technologies.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1082–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>.
- Evrendilek, F. & Ertekin, C. 2003. “Assessing the Potential of Renewable Energy Sources in Turkey. 2003;28:2303 – 15.” *Renewable Energy* 28: 2303–15.
- Expansión. 2020. “Economía Y Datos de Los Países,” <https://datosmacro.expansion.com/paises/> Expansion.
- Fan, J. & Furbo, S. 2012. “Thermal Stratification in a Hot Water Tank Established by Heat Loss from the Tank.” *Solar Energy* 86 (11): 3460–69. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.026>.
- Faraldo, M. 2007. “Thermal Balance of Minewater Treatment Lagoons and Wetlands.” Universidad de Newcastle.
- Featherstone, A. M. & O’Grady, B. V. 1997. “Removal of Dissolved Copper and Iron at the Freshwater-Saltwater Interface of an Acid Mine Stream.” *Marine Pollution Bulletin* 34 (5): 332–37. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(96\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(96)00089-6).
- Ferket, H. L. W., Laenen, B. J. M. & Van Tongeren, P. C. H. 2011. “Transforming Flooded Coal Mines to Large-Scale Geothermal and Heat Storage Reservoirs : What Can We Expect ?” In *11th International Mine Water Association Congress*, 171–76.
- Fernández, S., Esteban, J. & Fernández, R. 1986. *Abandono de Minas. Impacto Hidrológico*. Instituto Geológico y Minero de España. Cátedra de Hidrología, Escuela de Minas, Madrid.
- Fernández, P. 2018. “District Heating Geotérmico Con Agua de Mina a Diferentes Edificios Del Entorno Del Pozo Barredo En Mieres (Asturias).” *HUNOSA. Getinsa, Euroestudios, TPF*.
- Fishburn, P.C. 1967. “Additive Utilities with Incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments.” *American Society of Operations Research (ORSA)*.
- Frederiksen, S. & Werner, S. 2013. “District Heating and Cooling,” ISBN-13: 978-9144085302.
- Fried, E. 1969. “Thermal Conductivity’.” *Ed. R.P. Tye* 2.
- Fukuda, S., Kondou, C., Takata, Nobuo. & Koyama, S. 2014. “Low GWP Refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for High Temperature Heat Pumps.” *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.014>.
- Gadd, H. & Werner, S. 2013. “Daily Heat Load Variations in Swedish District Heating Systems.”





- Applied Energy* 106: 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.030>.
- Gagnon, L. & Van-de-Vate, J.F. 1997. “Greenhouse Gas Emissions from Hydropower: The State of Research in 1996.” *Energy Policy* 25: 7–13.
- García-Carro, F.M. & Solís, S. 2019. “Proyecto de Construcción de Una Red de Calor a Diferentes Edificios En El Entorno Del Pozo Fondón En Langreo.” *HUNOSA. Magna Dea, S.L.*
- Gasservei. n.d. “Ficha Técnica Del Gas Refrigerante R-1234ze.”
- George, R.Z. 2010. “Fixing the Problem of Analytical Mind- Sets : Alternative Analysis.” *International Journal of Intelligence and CounterIntelligence* 17 (3): 384–404. <https://doi.org/10.1080/08850600490446727>.
- Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S. & Melin, S. 2010. “A Multicriteria Approach to Evaluate District Heating System Options.” *Applied Energy* 87 (4): 1134–40. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>.
- Ghomshei, M. 2007. “Geothermal Energy from Con Mine for Heating the City of Yellowknife, NWT.”
- Ghoreishi, S.A., Ghomshei, M. M., Hassani, F. P. & Abbasy, F. 2012. “Sustainable Heat Extraction from Abandoned Mine Tunnels : A Numerical Model.” *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 4: 1–17.
- Goumas, M. & Lygerou, V. 2000. “An Extension of the PROMETHEE Method for Decision Making in Fuzzy Environment : Ranking of Alternative Energy Exploitation Projects.” *European Journal of Operational Research* 123: 606–13.
- Goumas, M.G., Lygerou, V.A. & Papayannakis, L.E. 1999. “Computational Methods for Planning and Evaluating Geothermal Energy Projects.” *Energy Policy* 27: 147–54.
- Graham, M.C. & Farmer, J.G. 2007. “Chapter 3. Chemistry of Freshwaters.” In *Principles of Environmental Chemistry*, 80–170.
- Gul, M. & Guneri, A.F. 2016. “A Fuzzy Multi Criteria Risk Assessment Based on Decision Matrix Technique: A Case Study for Aluminum Industry.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.11.023>.
- Gut, J.A.W. & Pinto, J.M. 2003. “Selecting Optimal Configurations or Multi-Selection Plate Heat Exchangers in Pasteurization Processes.” *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (24): 6112–24.
- Gut, J.A.W. & Pinto, M. 2004. “Optimal Configuration Design for Plate Heat Exchangers.” *Heat*



- and Mass Transfer* 47: 4833–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.002>.
- Hahn, F, Bussmann, G., Jagert, F., Ignacy, R., Bracke, R. & Seidel, T. 2018. “Reutilization of Mine Water as a Heat Storage Medium in Abandoned Mines.” In *11th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 1057–62.
- Hall, A., Scott, J. A. & Shang, H. 2011. “Geothermal Energy Recovery from Underground Mines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2): 916–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007>.
- Hallberg, K. B. & Johnson, D. B. 2005. “Biological Manganese Removal from Acid Mine Drainage in Constructed Wetlands and Prototype Bioreactors.” *Science of the Total Environment* 338: 115–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.011>.
- Hamill, L. 1980. “Evaluation of Induced Infiltration between the River Skerne and the Magnesian Limestone in South East Durham.” *J. Inst. Water Eng. Sci.*, no. 34: 161–171.
- Hamm, V. & B. Bazargan. 2010. “Modelling of Fluid Flow and Heat Transfer to Assess the Geothermal Potential of a Flooded Coal Mine in Lorraine, France.” *Geothermics* 39 (2): 177–86. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.004>.
- Hammarstrom, J. M., Sibrell, P. L. & Belkin, H. E. 2003. “Characterization of Limestone Reacted with Acid-Mine Drainage in a Pulsed Limestone Bed Treatment System at the Friendship Hill National Historical Site, Pennsylvania, USA.” *Applied Geochemistry* 18 (11): 1705–21. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(03\)00105-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(03)00105-7).
- Haralambopoulos, D.A. & Polatidis, H. 2003. “Renewable Energy Projects : Structuring a Multi-Criteria Group Decision-Making Framework.” *Renewable Energy* 28: 961–73.
- Harvey, S. & William D. 1978. “EER , COP , and the Second Law Efficiency for Air Conditioners.” *American Journal of Physics* 46 (19). <https://doi.org/10.1119/1.11174>.
- Harza, R.D. 1960. “Hydro and Pumped Storage for Peaking.” *Power Engineering* 64 (10): 79–82.
- Hassan, G. 2016. “Reducing the Water Hardness by Using Electromagnetic Polarization Method.” *Al-Khwarizmi Engineering Journal* 12 (4): 111–16.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22153/kej.2016.07.002>.
- Hepbasli, A. & Kalinci, Y. 2009. “A Review of Heat Pump Water Heating Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1211–29.



- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>.
- Herrero, A. 2012. “Laciana Is Black. Greens Go Away!’ Environmentalists as Scapegoats in a Mountaintop Removal Conflict in Laciana Valley, Spain.” *Organization and Environment* 25 (4): 419–36. <https://doi.org/10.1177/1086026612464973>.
- . 2013. “Anatomía de Un Conflicto Socioecológico. El Caso de La Minería de Carbón a Cielo Abierto En El Valle de Laciana.” Universidad Autónoma de Barcelona.
- Herrero, T. 2014. “Impacto de Los Drenajes Ácidos En Los Ecosistemas Acuáticos Producidos Por La Minería Del Carbón En El Bierzo: Bioacumulación de Metales Pesados Y Evolución de Las Comunidades Biológicas.” Universidad de León y Universidad de Oviedo.
- Higashi, Y., Hayasaka, S., & Ogiya, S. 2013. “Measurements of PvT Properties Vapor Pressures, and Critical Parameters for Low GWP Refrigerant R-1234ZE(Z).” *Proc. 4th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Delft, The Netherlands* Paper No.
- HIPSITEC. 2007. “Asesoramiento En La Integración de HUNOSA En La Gestión de Los Recursos Hídricos de La Cuenca Central Asturiana.”
- Hobbs, B.F. & Horn, G.T.F. 1997. “Building Public Confidence in Energy Planning: A Multi Method MCDM Approach to Demand Side Planning at BC Gas.” *Energy Policy* 5 (3): 357–75.
- Huang, C.L. & Yoon, K. 1981. “Multi Attribute Decision Making: Methods and Applications.” *New York: Springer-Verlag*.
- Huminc, G. & Huminc, A. 2011. “Heat Transfer Characteristics in Double Tube Helical Heat Exchangers Using Nanofluids.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54: 4280–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.017>.
- HUNOSA. 2010. “Aula Hunosa de la Geotermia Y de La Biomasa.” 2010. <http://www.aulahunosa.es/geotermia-2/>.
- . 2011. “Aula Hunosa de La Geotermia Y de La Biomasa.” 2011. <http://www.aulahunosa.es/centro-de-investigacion-y-residencia-de-estudiantes/>.
- . 2012. “Aula Hunosa de La Geotermia Y de La Biomasa.” 2012. <http://www.aulahunosa.es/hospital-alvarez-buylla/>.
- . 2019. “Aula Hunosa de La Geotermia Y de La Biomasa.” 2019.



- <http://www.aulahunosa.es/red-de-calor-mieres/>.
- Ibrahim, H., Ilinca, A. & Perron, J. 2007. "Energy Storage Systems – Characteristics and Comparisons." *Renew Sustain Energy Rev* 12: 1221–50.
- IDAE. 2011a. "Plan de Energías Renovables 2011-2020." *Instituto Para La Diversificación Y Ahorro de La Energía Del Gobierno de España*.
- . 2011b. "Resumen Del Plan de Energías Renovables." *Instituto Para La Diversificación Y Ahorro de La Energía Del Gobierno de España*.
- IGME. 1982. *Mapa Geológico de España E. 1:50.000 Villablino. Memoria Hoja 101*. Spain.
- IGME, IDAE &. 2008. *Manual de Geotermia*.
- Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. 1990. "Introduction to Heat Transfer." *2nd Edn. John Wiley, New York*.
- INEGA. 2020. "Instituto Energético de Galicia." *Instituto Energético de Galicia*, [http://www.inega.gal/informacion/diccionario\\_de\\_te](http://www.inega.gal/informacion/diccionario_de_te).
- Ingvar, B. 2006. "Geothermal Energy among the World's Energy Sources." *Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects in Central America, UNU-GTP and LaGeo. San Salvador*.
- INWATCO. 2005. "Integrated Water Management In Former Coal Mining Regions: Non-Technical Summary." [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE02\\_ENV\\_UK\\_000140\\_LAYMAN](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE02_ENV_UK_000140_LAYMAN). pdf.
- IRENA. 2015. "Renewable Power. Generation Costs in 2014." *The International Renewable Energy Agency (IRENA)*.
- Iribar, V., Izco, F., Tames, P., Antigüedad, I. & da Silva, A. 2000. "Water Contamination and Remedial Measures at the Troya Abandoned Pb-Zn Mine (The Basque Country, Northern Spain)." *Environmental Geology* 39: 800–806.
- Italsan. 2016. "Sistema de Tuberías Y Accesorios de Polipropileno Para Instalaciones Hidrosanitarias Y Climatización Líderes En Canalizar Soluciones." *Manual Técnico Sistema Niron*, <https://italsan.com/media/files/documentos/Docu%20>.
- . 2020. "Tarifa de Tuberías Y Accesorios de Polipropileno. Sistema Niron." [https://italsan.com/media/files/documentos/Tarifa%](https://italsan.com/media/files/documentos/Tarifa%20).



- Iyasele, J.U., David, K. & Idiata D.J. 2015. "Investigation of the Relationship between Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids for Mono-Valent , Di-Valent and Tri- Valent Metal Compounds." *International Journal of Engineering Research and Reviews* 3 (1): 40–48.
- Jankovic, Z. Sieres-Atienza, J. & Martínez-Suárez, J.A. 2015. "Thermodynamic and Heat Transfer Analyses for R1234yf and R1234ze ( E ) as Drop-in Replacements for R134a in a Small Power Refrigerating System." *Applied Thermal Engineering* 80: 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.041>.
- Janson, E., Gzyl, G., Głodniok, M. & Markowska, M. 2017. "Use of Geothermal Heat of Mine Waters in Upper Silesian Coal Basin , Southern Poland – Possibilities and Impediments." In *13th International Mine Water Association Congress Mine Water and Circular Economy*, 415–21.
- Jardón, S., Ordóñez, Al., Álvarez, R., Cienfuegos, P. & Loredó, J. 2013. "Mine Water for Energy and Water Supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain)." *Mine Water and the Environment* 32 (2): 139–51. <https://doi.org/10.1007/s10230-013-0224-x>.
- Jardón, J. S. 2010. "Aprovechamiento de Las Aguas de Mina En La Cuenca Central Asturiana Como Recurso Energético . Aplicación Al Embalse Minero Barredo-Figaredo." Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.
- Jardón, Santiago, Almudena Ordóñez, Rodrigo Álvarez, Pablo Cienfuegos, and Jorge Loredó. 2013. "Mine Water for Energy and Water Supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain)." *Mine Water and the Environment* 32 (2): 139–51. <https://doi.org/10.1007/s10230-013-0224-x>.
- Jarvis, A. P. &, and P. L. Younger. 2001. "Passive Treatment of Ferruginous Mine Waters Using High Surface Area Media." *Water Res* 35 (15): 3643–48.
- Jawahar, C.P. & Prawin, M.A. 2017. "A Review on Turbines for Micro Hydro Power Plant." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 882–87. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.133>.
- JBL. n.d. "Manual Del Test de Dureza JBL GMBH," <https://www.jbl.de/?lang=es&mod=products&func=deta>.
- Jessop, A. M., Macdonald, J. K. & Spence, R. 1995. "Clean Energy from Abandoned Mines at Springhill , Nova Scotia." *Energy Sources* 17: 93–106.
- Jiménez-Rodríguez, A.M., Durán-Barrantes, M.M., Borja, R., Sánchez, E., Colmenarejo, M.F. & Raposo, F. 2009. "Heavy Metals Removal from Acid Mine Drainage Water Using



- Biogenic Hydrogen Sulphide and Effluent from Anaerobic Treatment: Effect of pH.” *Journal of Hazardous Materials* 165 (1–3): 759–65. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.053>.
- Johnson, D. B. & Hallberg, K. B. 2005. “Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review.” *Science of the Total Environment* 338: 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>.
- Johnson, D.B. & Hallberg, K.B. 2005. “Biogeochemistry of the Compost Bioreactor Components of a Composite Acid Mine Drainage Passive Remediation System.” *Science of the Total Environment* 338: 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.008>.
- Johnson, D. B. 2003. “Chemical and Microbiological Characteristics of Mineral Spoils and Drainage Waters at Abandoned Coal and Metal Mines.” *Water, Air, and Soil Pollution* 3: 47–66.
- Kablan, M.M. 2004. “Decision Support for Energy Conservation Promotion : An Analytic Hierarchy Process Approach.” *Energy Policy* 32: 1151–58. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00078-8).
- Kalin, M., Fyson, A. & Wheeler, W. N. 2006. “The Chemistry of Conventional and Alternative Treatment Systems for the Neutralization of Acid Mine Drainage.” *Science of the Total Environment* 366 (2–3): 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.015>.
- Kang, T.K., Peterson, G.P. & Fletcher, L.S.J. 1990. “Heat Transfer” 112: 864.
- Karant, K.R. 1989. “Ground Water Assessment Development and Management.” *McGraw Hill Publications*, 720.
- Karsak, E.E. & Dursun, M. 2015. “An Integrated Fuzzy MCDM Approach for Supplier Evaluation and Selection.” *Computers & Industrial Engineering* 82: 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.01.019>.
- Kayode, A. 2007. “Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants.” *Gulf Professional Publishing*, ISBN-13: 978-0-7506-7766-0 (alk.
- Kelly, M. 1988. “Mining and the Freshwater Environment.” *Elsevier Applied Science, Cambridge*, 108–26.
- Kenny, R., Law, C. & Pearce, J.M. 2010. “Towards Real Energy Economics: Energy Policy Driven by Life-Cycle Carbon Emission.” *Energy Policy* 38: 1969–78.
- Kepler, D.A. & McCleary, E.C. 1994. “Successive Alkalinity-Producing Systems (SAPS) for



- Treatment of Acidic Mine Drainage.” In *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference*, 195–204.
- Kew, P. 1991. “An Investigation into Fouling of a Printed Circuit Heat Exchanger.” *Future Practice Report 13, Energy Efficiency Enquiries Bureau, Harwell, London*.
- Kiehl, J.T. & Trenberth, K.E. 1997. “Earth’s Annual Global Mean Energy Budget.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, no. 78: 197–208.
- Kim, W.T. & Cho, Y.I. 2001. “Effect of Electronic Anti-Fouling Treatment on Fouling Mitigation with Circulating Cooling-Tower Water.” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 28 (5): 671–80.
- Kondou, C. & Koyama, S. 2014. “Thermodynamic Assessment of High-Temperature Heat Pumps Using Low-GWP HFO Refrigerants for Heat Recovery.” *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>.
- Koohi-Kamali, S., Tyagi, V.V., Rahim, N.A., Panwar, N.L. & Mokhlis, H. 2013. “Emergence of Energy Storage Technologies as the Solution for Reliable Operation of Smart Power Systems: A Review.” *Renew Sustain Energy Rev* 25: 135–65.
- Kranz, K. & Dillenardt, J. 2010. “Mine Water Utilization for Geothermal Purposes in Freiberg, Germany: Determination of Hydrogeological and Thermophysical Rock Parameters.” *Mine Water and the Environment* 29 (1): 68–76. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0094-4>.
- Kukulka, D.J. & Devgun, M. 2007. “Fouling Surface Finish Evaluation.” *Applied Thermal Engineering* 27: 1165–72. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.041>.
- Kumar, A., & Saini, R.P. 2017. “Performance Analysis of a Single Stage Modi Fi Ed Savonius Hydrokinetic Turbine Having Twisted Blades.” *Renewable Energy* 113: 461–78. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.020>.
- Kuppan, T. 2000. “Heat Exchanger Design Handbook.” *Marcel Dekker, Inc.*, ISBN: 0-8247-9787-6.
- Lake, D.L. 1988. “Approching Environmental Acceptability in Cooling Water Corrosion Inhibition,.” *Corrosion Prevention and Control*, 113.
- Larowski, A. & Taylor, M.A. 1983. “Systematic Procedures for Selection of Heat Exchangers.” *Institution of Mechanical Engineers* 197A: 51–69.
- Ledin, M. & Pedersen, K. 1996. “The Environmental Impact of Mine Wastes - Roles of



- Microorganisms and Their Significance in Treatment of Mine Wastes.” *Earth-Science Reviews* 41 (1–2): 67–108. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(96\)00016-5](https://doi.org/10.1016/0012-8252(96)00016-5).
- Lee, M., Paik, I. S., Kim, I., Kang, H. & Lee, S. 2007. “Remediation of Heavy Metal Contaminated Groundwater Originated from Abandoned Mine Using Lime and Calcium Carbonate.” *Journal of Hazardous Materials* 144 (1–2): 208–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.007>.
- Lévesque, B., Lavoie, M. & Joly, J. 2004. “Residential Water Heater Temperature : 49 or 60 Degrees Celsius?.” *Can J Infect Dis* 15 (1): 11–12. <https://doi.org/10.1155/2004/109051>.
- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D. & Yang, Y. 2015. “Comparison of Geothermal with Solar and Wind Power Generation Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 1464–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>.
- López, L. 1985. “La Política Económica Española Posterior a La Crisis Del Petróleo.pdf.” [https://racef.es/archivos/publicaciones/tomo19\\_pp241\\_245.pdf](https://racef.es/archivos/publicaciones/tomo19_pp241_245.pdf).
- Loredo, C., Ordóñez, A., Garcia-Ordiales, E., Álvarez, R., Roqueñi, N., Cienfuegos, P., Peña, A. & Burnside, N. M. 2017. “Hydrochemical Characterization of a Mine Water Geothermal Energy Resource in NW Spain.” *Science of the Total Environment* 576: 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.084>.
- Loredo, C., Roqueñi, N. & Ordóñez, A. 2016. “Modelling Flow and Heat Transfer in Flooded Mines for Geothermal Energy Use: A Review.” *International Journal of Coal Geology* 164: 115–22. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>.
- Loredo, J., Ordóñez, A., Jardón, S. & Álvarez, R. 2011. “Mine Water as Geothermal Resource in Asturian Coal Mining Basins ( NW Spain ).” *Imwa 2011*, 177–82.
- Losa, A., Moreno, L. & Núñez, I. 2010. “Calidad Química de Las Aguas Subterráneas En Una Zona de Actividad Minera (Cuenca Del Bierzo- León).” *Boletín Geológico Y Minero* 1: 103–22.
- Lottermoser, B. G. 2007. “Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts.” *Springer*, 304.
- Luis, E., Purroy, F., Ansola, G., Falagán, J., Arroyo, P., & Álvarez, J. M. De. 2008. “Informe Ambiental Sobre El Proyecto de Explotación de Carbón a Cielo Abierto En Los Montes de Orallo (Villablino, León) ‘El Feixolín’ Promovido Por La Empresa MSP.” *Institute of Environment, Natural Resources and Biodiversity, Universidad de León*.





- Ma, Z., Li, H., Sun, Q., Wang, C., Yan, Ai. & Starfelt, F. 2014. "Statistical Analysis of Energy Consumption Patterns on the Heat Demand of Buildings in District Heating Systems." *Energy & Buildings* 85: 464–72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.048>.
- MacAdam, J. & Parsons, S.A. 2004. "Calcium Carbonate Scale Formation and Control." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3 (2): 159–69. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-3849-1>.
- Mackie, A. L. & Walsh, M. E. 2012. "Bench-Scale Study of Active Mine Water Treatment Using Cement Kiln Dust (CKD) as a Neutralization Agent." *Water Research* 46 (2): 327–34. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.030>.
- Madlener, R. & Specht, J.M. 2013. "An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines."
- Magraner, T., Montero, Á., Quilis, S. & Urchueguía, J.F. 2010. "Comparison between Design and Actual Energy Performance of a HVAC-Ground Coupled Heat Pump System in Cooling and Heating Operation." *Energy and Buildings* 42: 1394–1401. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.008>.
- Mahdevari, S., Shahriar, K. & Esfahanipour, A. 2014. "Human Health and Safety Risks Management in Underground Coal Mines Using Fuzzy TOPSIS." *Science of the Total Environment* 488: 85–99.
- Mahlia, T.M.I., Saktisahdan, T.J., Jannifar, A., Hasan, M.H., & Matseelar, H.S.C. 2014. "A Review of Available Methods and Developments on Energy Storage." *Renew Sustain Energy Rev* 33: 532–45.
- Malolepszy, Z., Demollin-schneiders, E. & Bowers, D. 2005. "Potential Use of Geothermal Mine Waters in Europe." In *World Geothermal Congress*, 1–3. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/0254.pdf>.
- Malolepszy, Z. 2003. "Geothermal Resources of Former Coal Mine Nowa Ruda , Poland." In *European Geothermal Conference*.
- Martínez, B. 1995. "Aguas Superficiales Y Subterráneas." In *Atlas Del Medio Natural de La Provincia de León (Instituto Tecnológico GeoMinero de España)*.
- Martínez, E. 2000. "Hidráulica." *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos*, ISBN: 978-84-380-0171-4.
- Matas, A., García-Carro, F. & Loredó, J. 2018a. "Characterization of Laciana Valley District



- Mine Water as Geothermal Resource.” *E3S Web of Conferences. 3rd International Conference on Advances on Clean Energy Research (ICACER)* 51 (1003): 26–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185101003>.
- . 2018b. “Treatments for Laciana Valley District Mine Water Discharges.” In *Proceedings CRETE 2018, Sixth International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management Chania*, ISSN: 2241-3146.
- Matlock, M.M., Howerton, B.S. & Atwood, D.A. 2002. “Chemical Precipitation of Heavy Metals from Acid Mine Drainage.” *Water Research* 36 (19): 4757–64. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00149-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00149-5).
- Maurin M., Maceda A. 1989. “Laciana.” *Diario de León . La Provincia de León Y Sus Comarcas.*, 1989.
- McGeorge, H.D. 2012. “General Engineering Knowledge.” *Third Edition*, ISBN-13: 978-1138171145.
- Mclachlan, D. 2011. “Physical Water Treatment Utilized in Food Manufacturing and Distribution Generation.” *CTI Journal. The Official Publication of the Cooling Technology Institute*. 32 (1).
- Mendiguchía, C. 2005. “Utilización de Ultratrazas de Metales Pesados Como Trazadores de Los Efectos Antropogénicos Producidos En Ecosistemas Acuáticos.” Universidad de Cádiz.
- Menéndez, J., Loredó, J., Fernández, J. M. & Galdo, M. 2017. “Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants with Mine Water in Abandoned Coal Mines.” In *13th International Mine Water Association Congress Mine Water and Circular Economy*, 6–13.
- Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Fernández-Oro, J. M.; Loredó, J. & Díaz-Aguado, M. B. 2020. “Feasibility Analysis of Using Mine Water from Abandoned Coal Mines in Spain for Heating and Cooling of Buildings.” *Renewable Energy* 146: 1166–76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.054>.
- Meteoblue. 2019. “Weather Model Theory.” [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/villablino\\_españa\\_3105748](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/villablino_españa_3105748).
- Mijnwater, B.V. 2018. “Mijnwater News (18-12-2018),” 2018.
- Milenic, D., Vasiljevic, P. & Vranjes, A. 2010. “Criteria for Use of Groundwater as Renewable



- Energy Source in Geothermal Heat Pump Systems for Building Heating/cooling Purposes. *Energy Build* 42:649 – 657.” *Energy Build* 42: 649–57.
- Miller, D.W. & Starr, M.K. 1969. “Executive Decisions and Operations Research.” *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, U.S.A.*
- Ministerio de la Presidencia. 2003. “Real Decreto 140/2003, de 7 de Febrero, Por El Que Se Establecen Los Criterios Sanitarios de La Calidad Del Agua de Consumo Humano.” *Boe* 45: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-3596>.
- . 2007. “RITE 2007. Reglamento de Instalaciones Térmicas En Los Edificios.” *Boletín Oficial Del Estado* 29 de Agos: 35931–84. <http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>.
- . 2013. “Real Decreto 238/2013, de 5 de Abril, Por El Que Se Modifican Determinados Artículos E Instrucciones Técnicas Del Reglamento de Instalaciones Térmicas En Los Edificios, Aprobado Por Real Decreto 1027/2007, de 20 de Julio.” *Boletín Oficial Del Estado* 5 de abril: 27563–93.
- Molés, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A. & Barragán-Cervera, Á. 2014. “Theoretical Energy Performance Evaluation of Different Single Stage Vapour Compression Refrigeration Configurations Using R1234yf and R1234ze(E) as Working Fluids.” *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.025>.
- Moore, J. N. & Luoma, S. N. 1990. “Hazardous Wastes from Large-Scale Metal Extraction: A Case Study.” *Environmental Science and Technology* 24 (9): 1278–85. <https://doi.org/10.1021/es00079a001>.
- Moore, Dames &. 1981. *An Assessment of Hydroelectric Pumped Storage. National Hydroelectric Power Resources Study. The U.S. Army Engineer Institute for Water Resources.*
- Morin, K. A. & Hutt, N. M. 1997. *Environmental Geochemistry of Mine Site Drainage: Practical Theory and Case Studies* .
- Mukherjee, R. 1998. “Effectively Design Shell and Tube Heat Exchangers.” *Chemical Engineering Progress. American Institute of Chemical Engineers.*
- Murr, R., Thieriot, H., Zoughaib, A. & Clodic, D. 2011. “Multi-Objective Optimization of a Multi Water-to-Water Heat Pump System Using Evolutionary Algorithm.” *Applied Energy* 88 (11): 3580–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.013>.



- Naves, J., Wiegand, T., Revilla, E., & Delibes, M. 2003. "Endangered Species Constrained by Natural and Human Factors: The Case of Brown Bears in Northern Spain. Conservation Biology , 17 , 1276-1289." *Conservation Biology* 17: 1276–89.
- Neculita, C.M. & Zagury, G.J. 2008. "Biological Treatment of Highly Contaminated Acid Mine Drainage in Batch Reactors: Long-Term Treatment and Reactive Mixture Characterization." *Journal of Hazardous Materials* 157: 358–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.002>.
- Neksa, P., Rekstad, H., Zakeri, G.R. & Schiefloe, P.A. 1998. "CO<sub>2</sub>-Heat Pump Water Heater: Characteristics , System Design and Experimental Results." *International Journal of Refrigeration* 21 (3): 172–79.
- "Nomenclátor." 2018. *Instituto Nacional de Estadística*, <https://www.ine.es/nomen2/index.do>.
- Ochsner, K. 2008. "Geothermal Heat Pumps. A Guide to Planning & Installing." *Earthscan, London, UK*, ISBN:978-1138141117.
- Ohmura, T., Tsuboi, M. & Tomimura, T. 2002. "Estimation of the Mean Thermal Conductivity of Anisotropic Materials." *International Journal of Thermophysics* 23 (3): 843–53.
- Parsons, S.A. 1999. "Overall of Recent Magnetic Treatment Research at Cranfield University." *Cranfield University, 3rd Symposium, UK*.
- Peláez, E. 2020. "La Red de Geotermia de Langreo Entrará En Funcionamiento El Próximo Año." *La Nueva España*, 2020. <https://www.lne.es/cuencas/2020/02/02/red-geotermia-langreo-entrara-funcionamiento/2592790.html>.
- Peralta, E. & Falcone, Gi. 2013. "Recovery of the Geothermal Energy Stored." *Clean Energy Systems in the Subsurface*, 143–55. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37849-2>.
- Pérez, A. 2013. "Marcha Negra En Contra Del Ajuste En España." *Laciana Del Reggae.blogspot*. <http://lacienciadelreggae.blogspot.com/2013/07/marcha-negra-en-contra-del-ajuste-en.html>.
- Perko, J., Dugec, V., Topic, D., Slijivac, D. & Kovac, Z. 2011. "Calculation and Design of the Heat Pumps." *3rd International Youth Conference on Energetics*, 1–7.
- Pitarch, M., Navarro-peris, E., González-Maciá, J. & Corberán, J.M. 2017. "Evaluation of Different Heat Pump Systems for Sanitary Hot Water Production Using Natural Refrigerants." *Applied Energy* 190: 911–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.166>.



- Pohekar, S .D. & Ramachandran, M. 2004. "Application of Multi-Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning — A Review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 8: 365–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>.
- Ponce, J. 2012. "Construcción de Un Compensador Hidráulico." *Javier Ponce Formación Técnica Blogspot*, <http://javiponce-formatec.blogspot.com/2012/09/con>.
- Preene, M. & Younger, P. L. 2014. "Can You Take the Heat? – Geothermal Energy in Mining." *Mining Technology* 123 (2): 107–18. <https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>.
- Pujades, E., Orban, P., Bodeux, S., Archambeau, P., Ercicum, S. & Dassargues, A. 2017. "Underground Pumped Storage Hydropower Plants Using Open Pit Mines : How Do Groundwater Exchanges Influence the Efficiency?" *Applied Energy* 190: 135–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.093>.
- Pujades, E., Willems, T., Bodeux, S., Orban, P. & Dassargues, A. 2016. "Underground Pumped Storage Hydroelectricity Using Abandoned Works (Deep Mines or Open Pits) and the Impact on Groundwater Flow." *Hydrogeology Journal* 24 (6): 1531–46. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1413-z>.
- RAE. 2020. "Definición de Caudal." *Diccionario de La Real Academia de La Lengua Española*, <http://dle.rae.es/?id=HOFmHUL>. <http://dle.rae.es/?id=HOFmHUL>.
- Rafferty, K. 2000. "Scaling in Geothermal Heat Pump Systems." *Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR*, no. March: 11–16.
- Ramos, H.M., Borga, A. & Simão, M. 2009. "New Design Solutions for Low-Power Energy Production in Water Pipe Systems." *Water Science and Engineering* 2 (4): 69–84. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.007>.
- Raymond, J. & Therrien, R. 2008. "Low-Temperature Geothermal Potential of the Flooded Gaspé Mines , Québec, Canada." *Geothermics* 37: 189–210. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.10.001>.
- Renz, A. Rühaak, W., Schätzl, P. & Diersch, H. J. G. 2009. "Numerical Modeling of Geothermal Use of Mine Water: Challenges and Examples." *Mine Water and the Environment* 28 (1): 2–14. <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0063-3>.
- Revuelta, J. F., De la Puente, T., Egúren, V. G. & Roa, C. 1999. "Planificación de La Actividad Rural Ganadera En La Comarca de Llaciana. Un Proyecto de Investigación Y Desarrollo Rural." *Polígonos* 8: 239–61.



- Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. US Dept Agriculture Handbook.*
- Roiz, M. 1974. "Urbanismo Y Hábitat En La Zona Minera de León." *Ciudad Y Territorio, Revista de Ciencia Urbana* 2 (1973-1974-1): 49–66.
- Romanov, D.O., Yavorovsky, Y.V. & Smirnov, V.V. 2019. "Application of Thermohydraulic Dispatcher for Existing and New District Heating Systems." *III International Scientific and Technical Conference "Energy Systems"* 552. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012025>.
- Romanov, D.O. & Yavorovsky, Y.V. 2019. "Investigation of Thermohydraulic Dispatcher Properties and Peculiarities." *E3S Web of Conferences. SES-2019* 124. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401009>.
- Roy, B. & Bertier, P. 1973. "La Methode ELECTRE II: Une Methode Au Media-Planning." *Amsterdam: North-Holland.*
- Roy, B. 1968. "Classement et Choix En Presence de Points de Vue Multiples. La Methode ELECTRE RIRO 1968;8:57 – 75." *Revue Française D'informatique et de Recherche Opérationnelle* 1: 57–75. [http://www.numdam.org/item?id=RO\\_1968\\_\\_2\\_1\\_57\\_0](http://www.numdam.org/item?id=RO_1968__2_1_57_0).
- . 1978. "Electre III: Un Algorithme de Methode de Classements Fonde Sur Une Representation Floue Des Préférences En Presence de Critères Multiples." *Cahieres de CER* 20 (1): 3–24.
- Rubio, A., Trenas, J.A., Robles, J., Pardo, A. & Cortizo, J. 2012. *La Minería Del Carbón En Castilla Y León Desde El Punto de Vista de Su Sostenibilidad Y de Su Carácter Como Reserva Estratégica.*
- Rule, B.M., Worth, Z.I. & Boyle, C. 2009. "Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand." *Environmental Science & Technology* 43: 6406–13.
- Rybach, L. 2014. "Geothermal Power Growth 1995–2013—A Comparison with Other Renewables." *Energies* 7: 4802–12. <https://doi.org/10.3390/en7084802>.
- Saaty, T.L. 1980. "The Analytic Hierarchy Process." *MacGraw-Hill. New York, USA.*
- Sabihuddin, Si., Kiprakis, A.E. &, and M. Mueller. 2015. "A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies." *Energies* 8 (1): 172–216. <https://doi.org/10.3390/en8010172>.



- San-Cristóbal, J.R. 2011. "Multi-Criteria Decision-Making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: The Vikor Method." *Renewable Energy* 36 (2): 498–502. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>.
- Sánchez, D., Cabello, R., Llopis, R., Arauzo, I. & Catalán-Gil, E. 2016. "Energy Performance Evaluation of R1234yf , R1234ze (E), R600a , R290 and R152a as Low-GWP R134a Alternatives." *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.09.020>.
- Sánchez, J. 2007. "La Minería Leonesa Del Carbón Durante La Autarquía." *Estudios Humanísticos. Historia.*, 245–71.
- Sanz, N. 2018. "La Minería Del Carbón En España, Entre El Abandono Y La Supervivencia : Aproximación Al Caso de El Bierzo ." Universidad de Valladolid.
- Šarka, V., Zavadskas, E.K., Ustinovičius, L. & Ignatavičius, Č. 2010. "System of Project Multicriteria Decision Synthesis in Construction." *Technological and Economic Development of Economies* 14 (4): 546–65. <https://doi.org/10.3846/1392-8619.2008.14.546-565>.
- Satterley, C. J., Chamberlain, Si. & Broughton, P. 2017. "Integration of Heat Recovery and Renewables within a Mine Water Treatment Scheme : A UK Case Study." In *13th International Mine Water Association Congress Mine Water and Circular Economy*, edited by Häkkinen A Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, 907–14.
- Schell, C., Macklin, M.G. & Hudson-Edwards, K.A. 1996. "Flood Dispersal and Alluvial Storage of Heavy Metals in an Acid Ephemeral River: Rio Tinto, Huelva, SW Spain. Proc. Int. Symp. Geochem. Earth's Surf., 4 , 475-479. Ed. S.H. Bottrell." In *Proceedings of the 4th International Symposium in Geochemistry*, 475–79. S.H. Bottrell.
- Self, S.J., Reddy, B.V. & Rosen, M.A. 2013. "Geothermal Heat Pump Systems : Status Review and Comparison with Other Heating Options." *Applied Energy* 101: 341–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>.
- Sengül, Ú., Mirac, E., Shiraz, S.E., Gezder, V. & Sengül, A.B. 2015. "Fuzzy TOPSIS Method for Ranking Renewable Energy Supply Systems in Turkey." *Renewable Energy* 75: 617–25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.045>.
- Shah, R.K. & Sekilic, D.P. 2003. "Fundamentals of Heat Ex-Changer Design." *Publ. by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA*, 939.
- Sheppard, T.H. 2005. "A Stratigraphical Framework for the Upper Langsettian and



- Duckmantian of the East Pennine Coalfields. British Geological Survey Internal Report IR/05/070. British Geological Survey, Keyworth, Nottinghamshire, UK." *British Geological Survey Internal Report IR/05/070*.
- Shuval, H.I., Adin, A., Fiatal, B., Raawitz, E. & Yekuterl, P. 1986. "Wastewater Irrigation in Developing Countries: Health Effects and Technical Solutions." *World Bank Technical Paper* 51: 324.
- Singh, A. K., Basin, V., Babita, N. & Singh, K. K. 2010. "Quality Assessment of Mine Water in the Raniganj Coalfield Area , India Quality Assessment of Mine Water in the Raniganj Coalfield Area , India." *Mine Water and the Environment* 29: 248–62. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0108-2>.
- Singh, S. & Jakhar, S. 2014. "Performance Investigation of Plate Type Heat Exchanger ( A Case Study)." *Int. Journal of Engineering Research and Applications* 4 (4): 127–31.
- Skouson, J., Rose, A., Geidel, G., Evans, R. & Hallier, W. 1998. "Handbook of Technologies for Avoidance and Treatment of Acid Mine Drainage." *Morgentown, West Virginia: National Mine Land Reclamation Center*, 6.
- Stoertz, M.W., Hughes, M.L., Wanner N.S. & Farley M.E. 2001. "Long-Term Water Quality Trends at a Sealed, Partially Flooded Underground Mine." *Environ. Eng. Geosci.* 12 (1): 51–65.
- Strantzali, E. & Aravossis, K. 2016. "Decision Making in Renewable Energy Investments : A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 885–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021>.
- Stubblefield, M.A., Pang, S.S. & Cundyt, V.C. 1996. "Heat Loss in Insulated Pipe - the Influence of Thermal Contact Resistance: A Case of Study." *Composites* 27 (1): 85–93.
- Suárez, M.J. 2014. "Apuntes de La Asignatura de Termodinámica Y Sistemas Energéticos." *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos de La Universidad de Madrid*.
- Suberu, M.Y., Mustafa, M.W. & Bashir N. 2014. "Energy Storage Systems for Renewable Energy Power Sector Integration and Mitigation of Intermittency." *Renew Sustain Energy Rev* 35: 499–514.
- Szabolcs, I. & Darab, C. 1964. "(1964) The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils. In: Szabolcs I (Ed) Proceedings of 8th International Congress on Int Soc Soil Sci, Res Inst Soil Sci Agro Chem, Hungarian Acad Sci, P 803-812." In





- Proceedings of 8th International Congress on International Society of Soil Scienc, Research Institute of Soil Science and Agrochemistry, Hungarian Academy of Science.,* 803–12.
- Tascón, F. 2018. “Visto Bueno Ambiental a Una Central Hidroeléctrica Que Limpiará El Agua de Las Minas.” *Radio Bierzo Cadena Ser*, 2018. [https://cadenaser.com/emisora/2018/12/27/radio\\_bierzo/1545916682\\_065865.html](https://cadenaser.com/emisora/2018/12/27/radio_bierzo/1545916682_065865.html).
- Taylor, K., Banks, D. & I. Watson. 2016. “Characterisation of Hydraulic and Hydrogeochemical Processes in a Reducing and Alkalinity-Producing System (RAPS) Treating Mine Drainage, South Wales, UK.” *International Journal of Coal Geology* 164: 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.05.007>.
- TEMA. 2007. “Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association.” *Tubular Exchanger Manufacturers Association, INC*. Ninth edit.
- Teng, K.H., Baharudin, R.H., Bakar, M.A. & Kazi, S.N. 2016. “Mitigation of Heat Exchanger Fouling in Industry Using Catalytic Materials.” *Desalination and Water Treatment* 57 (1): 22–27. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1012334>.
- Tóth, A. & Bobok, E. 2007. “A Prospect Geothermal Potential of an Abandoned Copper Mine.” In *32th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Triantaphyllou, E. & Mann, S.H. 1995. “Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges.” *Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice* 2 (1): 35–44.
- Triantaphyllou, E. 2000. “Multicriteria Decision Making Methods.” *Springer-Science+Business Media, B.V.*, ISBN: 978-1-4757-3157-6.
- Trojanowska, M. & Szul, T. 2008. “Determination of Heat Demand in Rural Communes.” *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN* 8a: 180–87.
- Trojanowska, M. & Tomasz, S. 2006. “Modelling of Energy Demand for Heating Buildings, Heating Tal Water and Cooking in Rural Households.” *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln*, 184–90.
- Trom, L. 1995. “Use Spiral Plate Exchangers for Various Applications.” *Hydrocarbon Processing* 74 (5): 73–80.
- Uhlík, J. & Baier, J. 2012. “Model Evaluation of Thermal Energy Potential of Hydrogeological Structures with Flooded Mines.” *Mine Water and the Environment* 31 (3): 179–91.



- <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0186-4>.
- Vadillo, L., Aduvire, O., Alberruche, M.E., Arranz, J.C., Lacal, M., Martínez, B. & Moreno, C. 2006. "Acuerdo Específico de Colaboración Entre El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Y Tecnológicas (Ciemat) Y El Instituto Geológico Minero de España (IGME) Para La Restauración Ambiental de La Región Del Bierzo."
- Vasauskas, V. & Baskutis, S. 2006. "Failures and Fouling Analysis in Heat Exchangers." *Mechanika* 61 (5): 24–31.
- Vega, J. 2003. "Minería Y Desarrollo Empresarial En León: El Caso de Minero Siderúrgica de Ponferrada." Universidad de Valladolid.
- Velasco, A. 2018. "La Red de Calor Con Agua de Mina de Mieres Estará Lista El Próximo Año." *La Nueva España*, 2018. <https://www.ine.es/cuencas/2018/06/07/red-calor-agua-mina-mieres/2299129.html>.
- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. & Demollin, E. 2014. "Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling." *Energy Procedia* 46: 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158>.
- Villa, E., Robles, J. A., Alonso, E. & and M. Vidal. 2008. "Aspectos Geoquímicos de Las Aguas Superficiales de La Cuenca Minera Del Bierzo ( León )." *Revista de La Sociedad Española de Minerología* 10: 145–46.
- Walraven, D., Laenen, B. & D'Haeseleer, W. 2014. "Comparison of Shell-and-Tube with Plate Heat Exchangers for the Use in Low-Temperature Organic Rankine Cycles." *Energy Conversion and Management* 87: 227–37. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.019>.
- Wang, C.C., Fu, W.L. & Chang, C.T. 1997. "Heat Transfer and Friction Characteristics of Typical Wavy Fin-and-Tube Heat Exchangers." *Experimental Thermal and Fluid Science* 14 (2): 174–86. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(96\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00056-8).
- Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., & Zhao, J.H. 2009. "Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 2263–78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>.
- Wang, L. & Sund, B. 2003. "Optimal Design of Plate Heat Exchangers with and without Pressure Drop Specifications." *Applied Thermal Engineering* 23: 295–311.



- Watzlaf, G. & Ackman, T. E. 2006. "Underground Mine Water for Heating and Cooling Using Geothermal Heat Pump Systems." *Mine Water and the Environment* 25 (1): 1–14. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-006-0103-9>.
- Watzlaf, G. R. & Hedin, R. S. 1993. "A Method for Predicting the Alkalinity Generated by Anoxic Limestone Drains." In *Proceedings of the 14th Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium*.
- White, Frank. 2008. "Mecánica de Fluidos." *McGraw-Hill* 6ª Edición: ISBN: 978-84-481-6603.
- Wieber, G. & Pohl, S. 2008. "Mine Water : A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif." In *International Mine Water Association Congress*, 113–16. [http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa\\_2008/IMWA2008\\_051\\_Wieber.pdf&ei=J4NZUoS RFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEDwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_051_Wieber.pdf&ei=J4NZUoS RFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEDwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms).
- Wieber, Georg, and Stefan Pohl. 2008. "Mine Water : A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif." *International Mine Water Association Congress*, 113–16. [http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa\\_2008/IMWA2008\\_051\\_Wieber.pdf&ei=J4NZUoS RFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEDwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_051_Wieber.pdf&ei=J4NZUoS RFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEDwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms).
- Wierzbicki, A.P. 1982. "A Mathematical Basis for Satisficing Decision Making." *Mathematical Modelling* 3: 391–405.
- Wikimapia. 2020. "Embalse de Las Rozas," <http://wikimapia.org/4247476/es/Embalse-de-las-Roz>.
- Wilcox, L.V. 1955. "Classification and Use of Irrigation Waters." *USDA, Circular* 969.
- Wolkersdorfer, C. 2008. *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*. Springer.
- Wong, I.H. 1996. "An Underground Pumped Storage Scheme in the Bukit Timah Granite of Singapore." *Tunneling Underground Space Technology* 11 (4): 485–89.
- Wood, S.C., Younger, P.L. & Robins, N.S. 1999. "Long-Term Changes in the Quality of Polluted Minewater Discharges from Abandoned Underground Coal Workings in Scotland." *J. Eng. Geol.*, no. 32: 69–79.



- Wu, X. & Cremaschi, L. 2012. "Thermal and Chemical Analysis of Fouling Phenomenon in Condensers for Cooling Tower Applications." *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*.
- Yang, X. & Svendsen, S. 2017. "Achieving Low Return Temperature for Domestic Hot Water Preparation by Ultra Low-Temperature District Heating." *Energy Procedia* 116: 426–37. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.090>.
- Yavorovsky, Y.V, Romanov, D.O. & Khromchenkov, V.G. 2018. "Experimental Research of Thermo-Hydraulic Separators and Dispatchers in Heat Supply Systems." *Solid State Phenomena. Trans Tech Publications, Switzerland*. 284: 1385–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1385>.
- Ye, G. & Soga, K. 2012. "Energy Harvesting from Water Distribution Systems." *Journal of Energy Engineering, American Society of Civil Engineers*. 138 (1): 7–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000057).
- Younger, P.L., Banwart, S.A. & Hedin, R.S. 2002. *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*.
- Younger, P.L. 2004. "Environmental Impacts of Coal Mining and Associated Wastes: A Geochemical Perspective." *Geological Society, London. Special Publications*, no. 236: 169 – 209.
- . 2016. "Abandoned Coal Mines: From Environmental Liabilities to Low-Carbon Energy Assets." *International Journal of Coal Geology* 164: 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.08.006>.
- Yovanovich, M.M. 1986. "Heat Transfer." *Eds C.L. Tien, V.P. Carey and J.K. Ferrel* 1.
- Zadeh, L.A. 1965. "Fuzzy Sets." *Information and Control* 3: 338–53.



# ANEXO 1. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA



## A1. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

### ÍNDICE

1. Situación
2. Planta general
3. Detalles de zanja
  - 3.1. Detalles de zanja tipo 1
  - 3.2. Detalles de zanja tipo 2
  - 3.3. Detalles de zanja tipo 3
  - 3.4. Detalles de zanja tipo 4
4. Sala de generación
  - 4.1. Situación actual
  - 4.2. Situación proyectada
  - 4.3. Implantación zonal
5. Salas técnicas
  - 5.1. Ayuntamiento
  - 5.2. Casa de la cultura
  - 5.3. Centro de salud Valle de Laciana
  - 5.4. Polideportivo
  - 5.5. Colegio público San Miguel
  - 5.6. IES Obispo Argüelles. Edificio principal.
  - 5.7. IES Obispo Argüelles. Edificio entrada.
  - 5.8. IES Obispo Argüelles. Gimnasio.
6. Esquemas de principio
  - 6.1. Sala de generación
  - 6.2. Ayuntamiento
  - 6.3. Casa de la cultura
  - 6.4. Centro de salud Valle de Laciana
  - 6.5. Polideportivo
  - 6.6. Colegio público San Miguel
  - 6.7. IES Obispo Argüelles. Edificio principal.
  - 6.8. IES Obispo Argüelles. Edificio entrada.



### 6.9. IES Obispo Argüelles. Gimnasio.

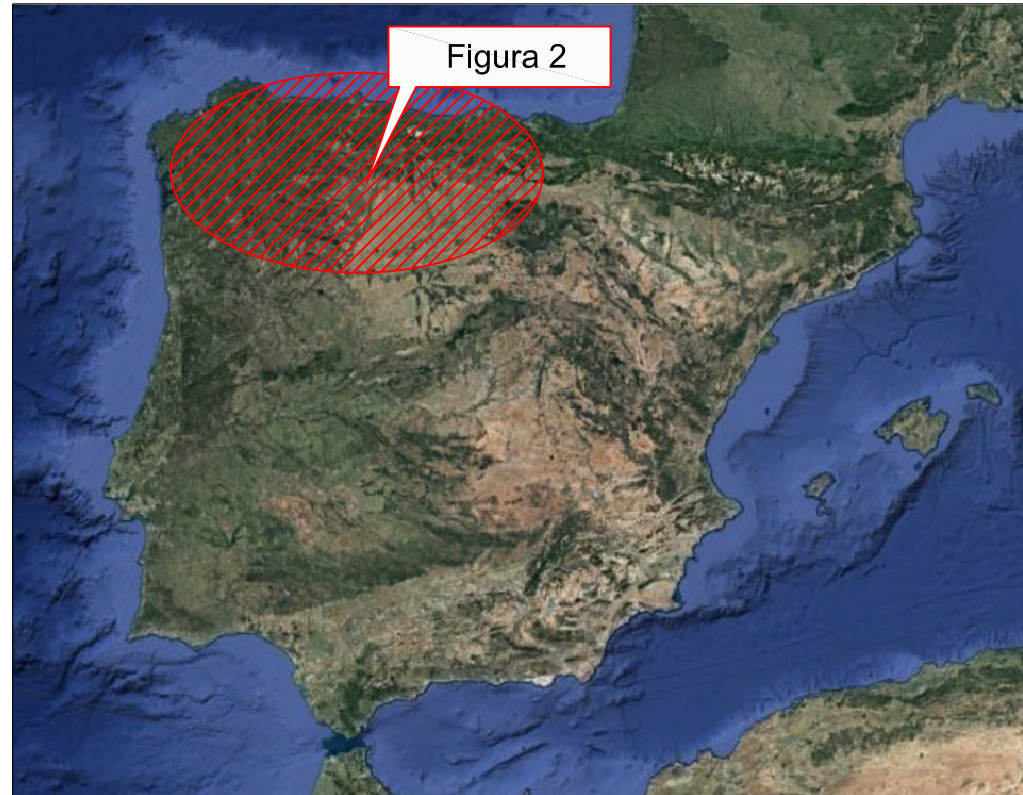


Figura 1 Escala 1:1.000.000



Figura 2 Escala 1:300.000

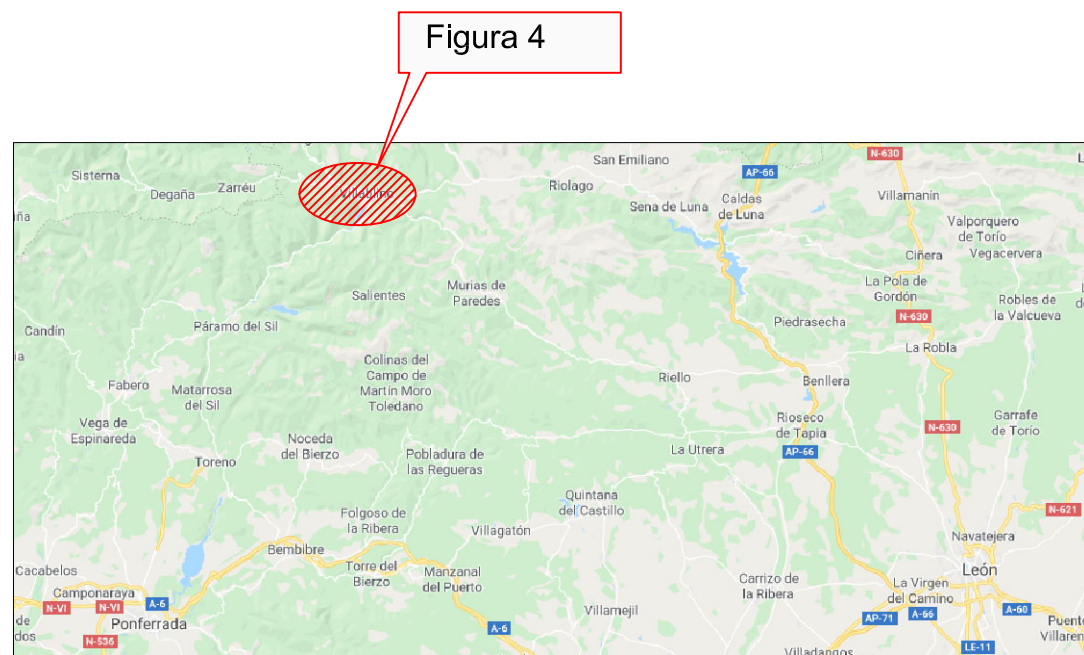
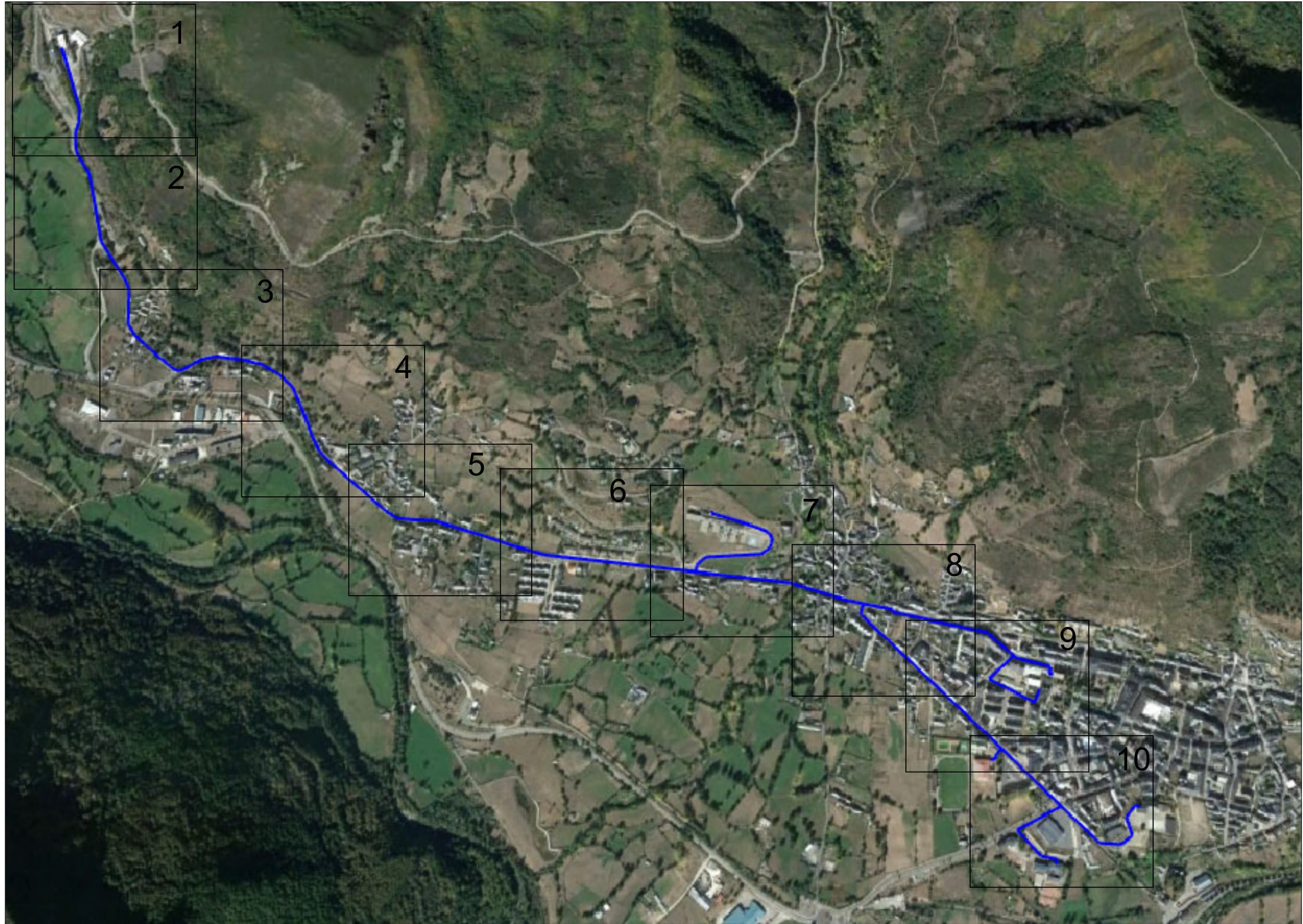


Figura 3 Escala 1:80.000



Figura 4 Escala 1:800







Sala generación

Bocamina Calderón

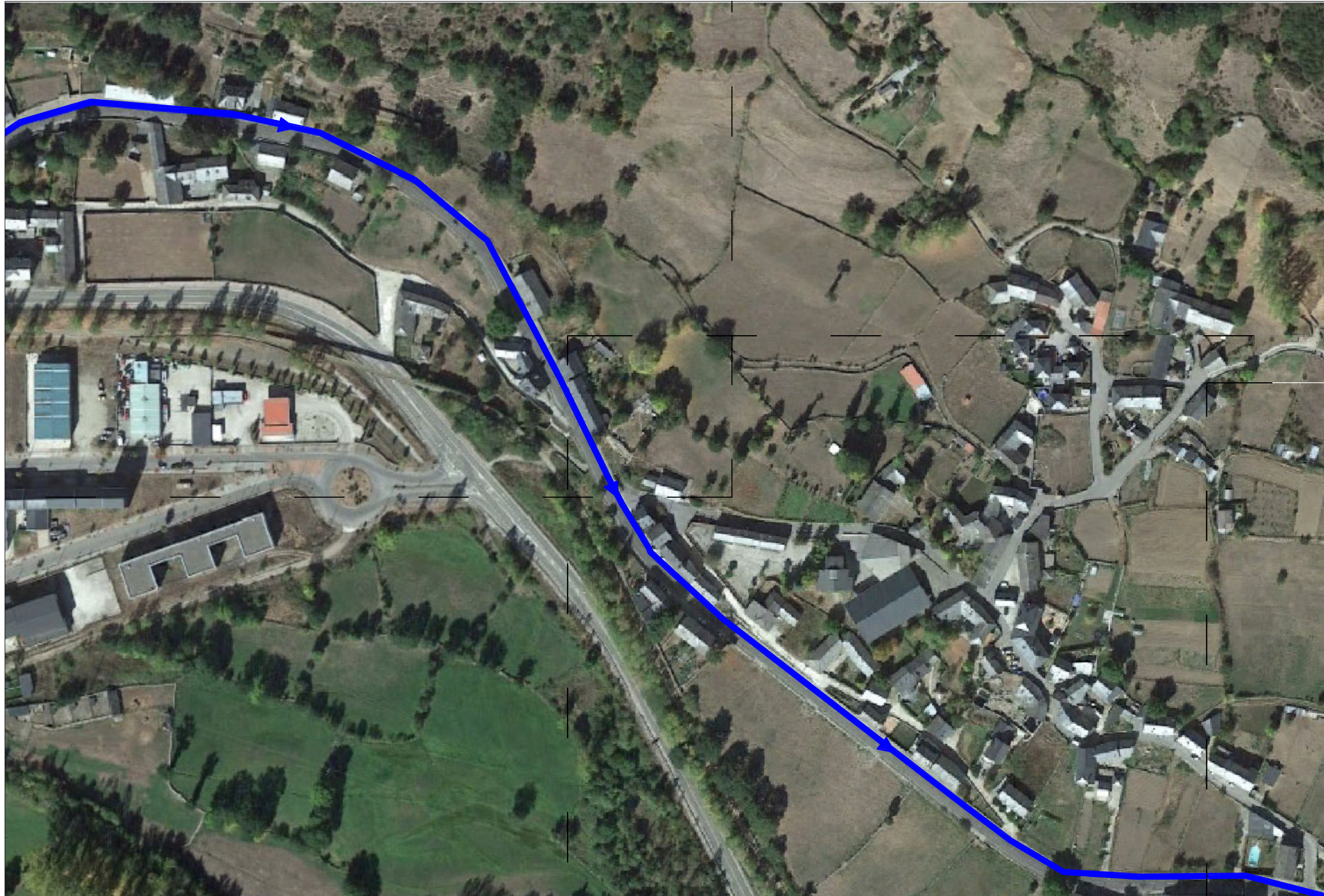
| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |



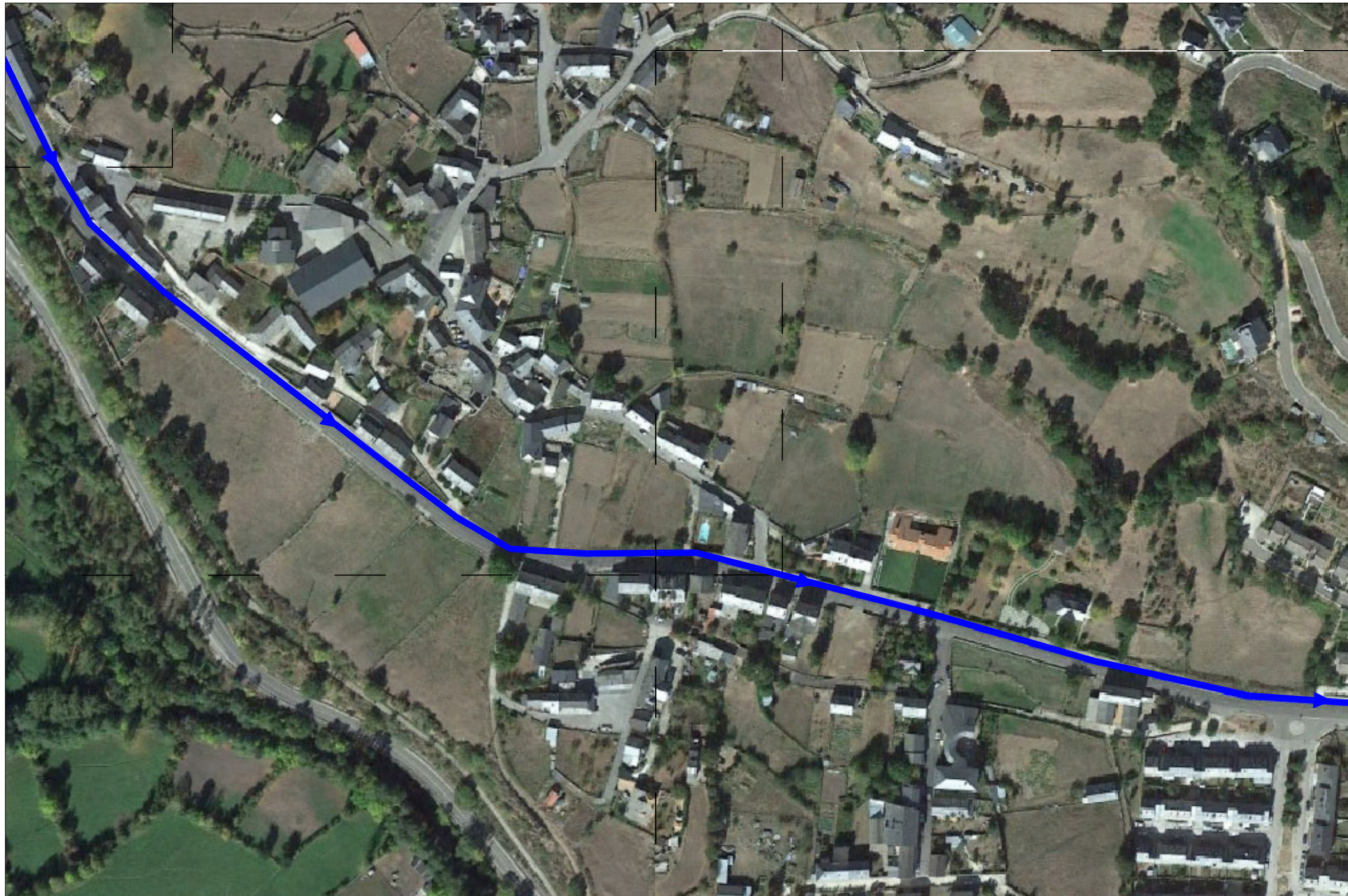
| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |



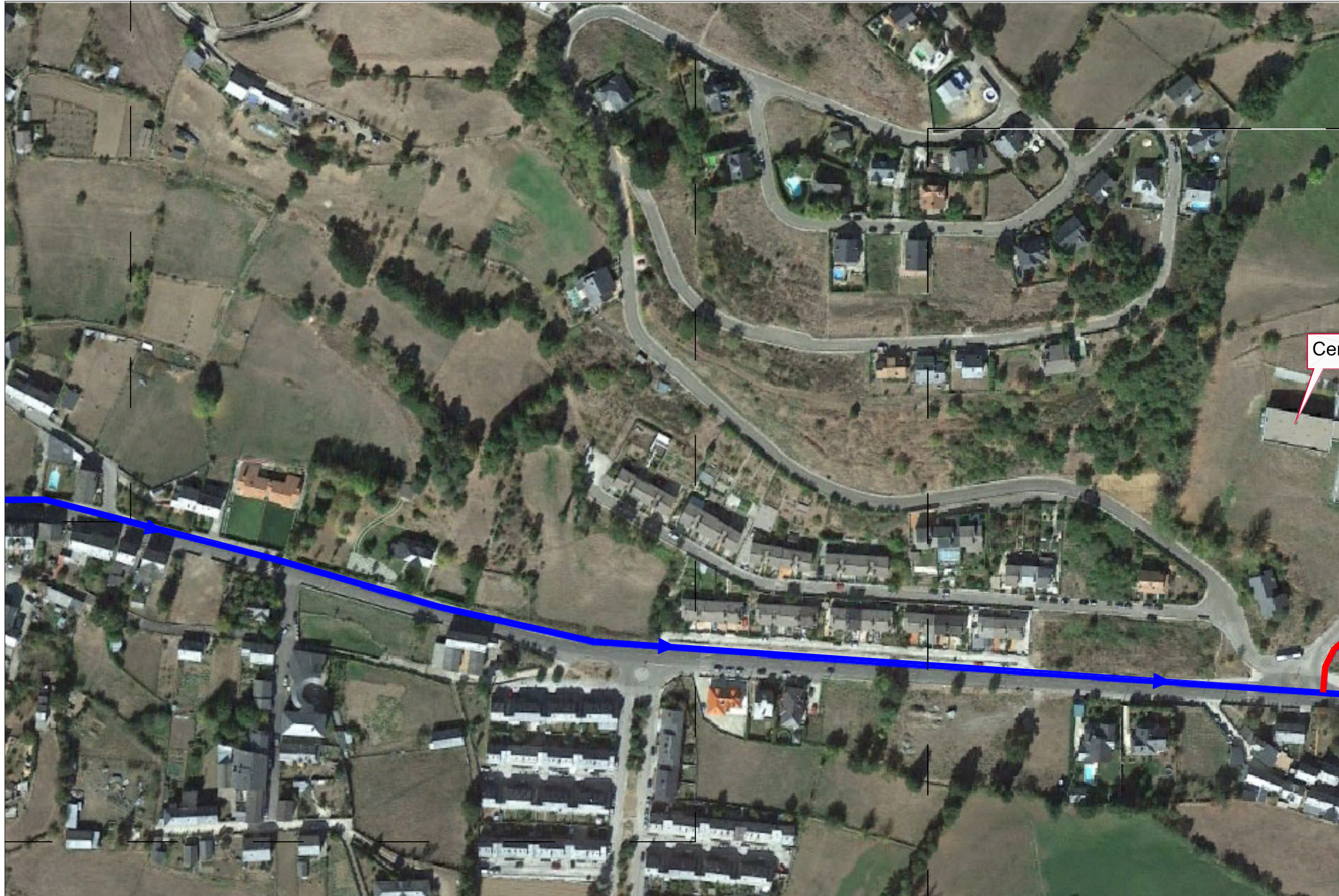
| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |



| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |

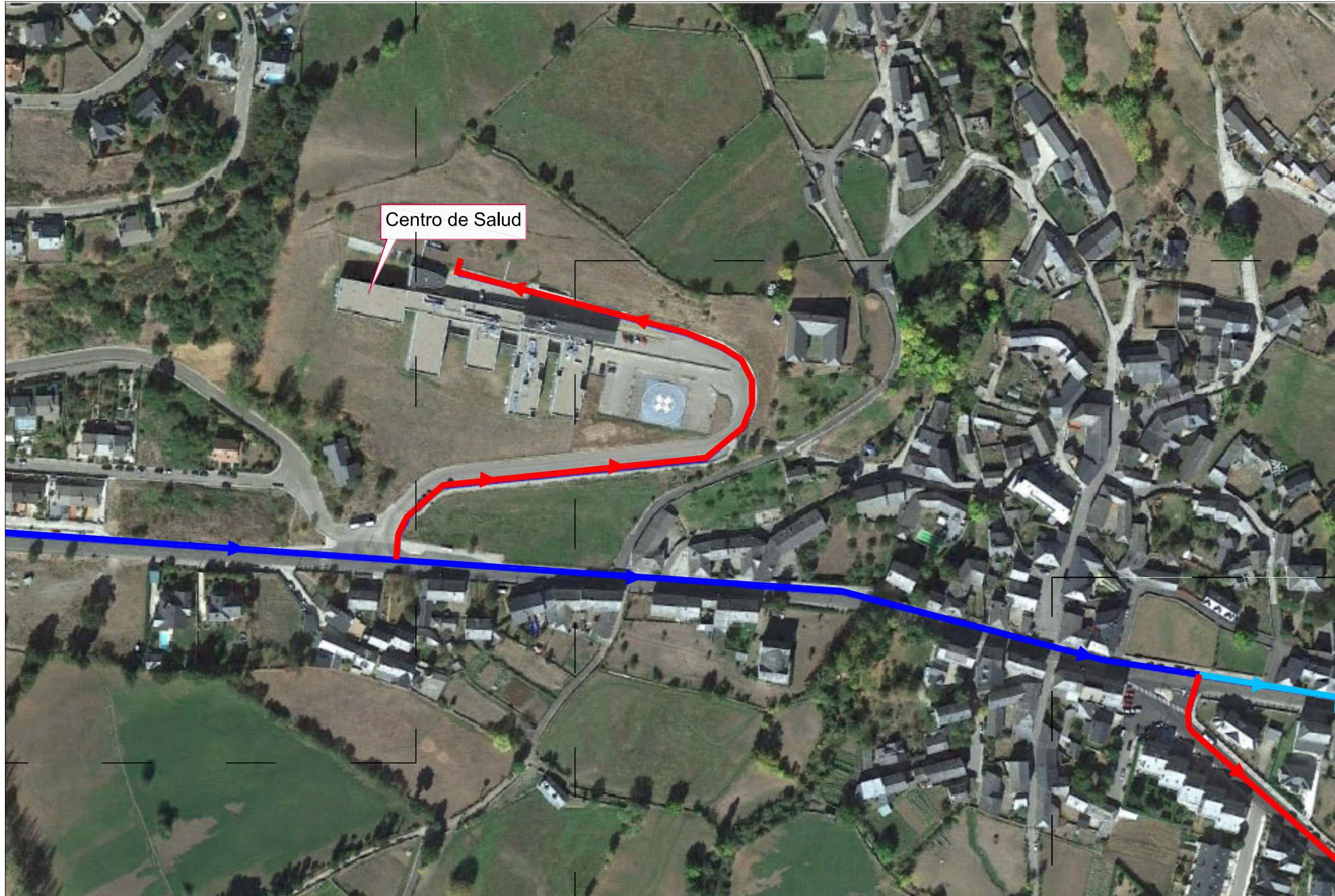


| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |



Cer

| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |

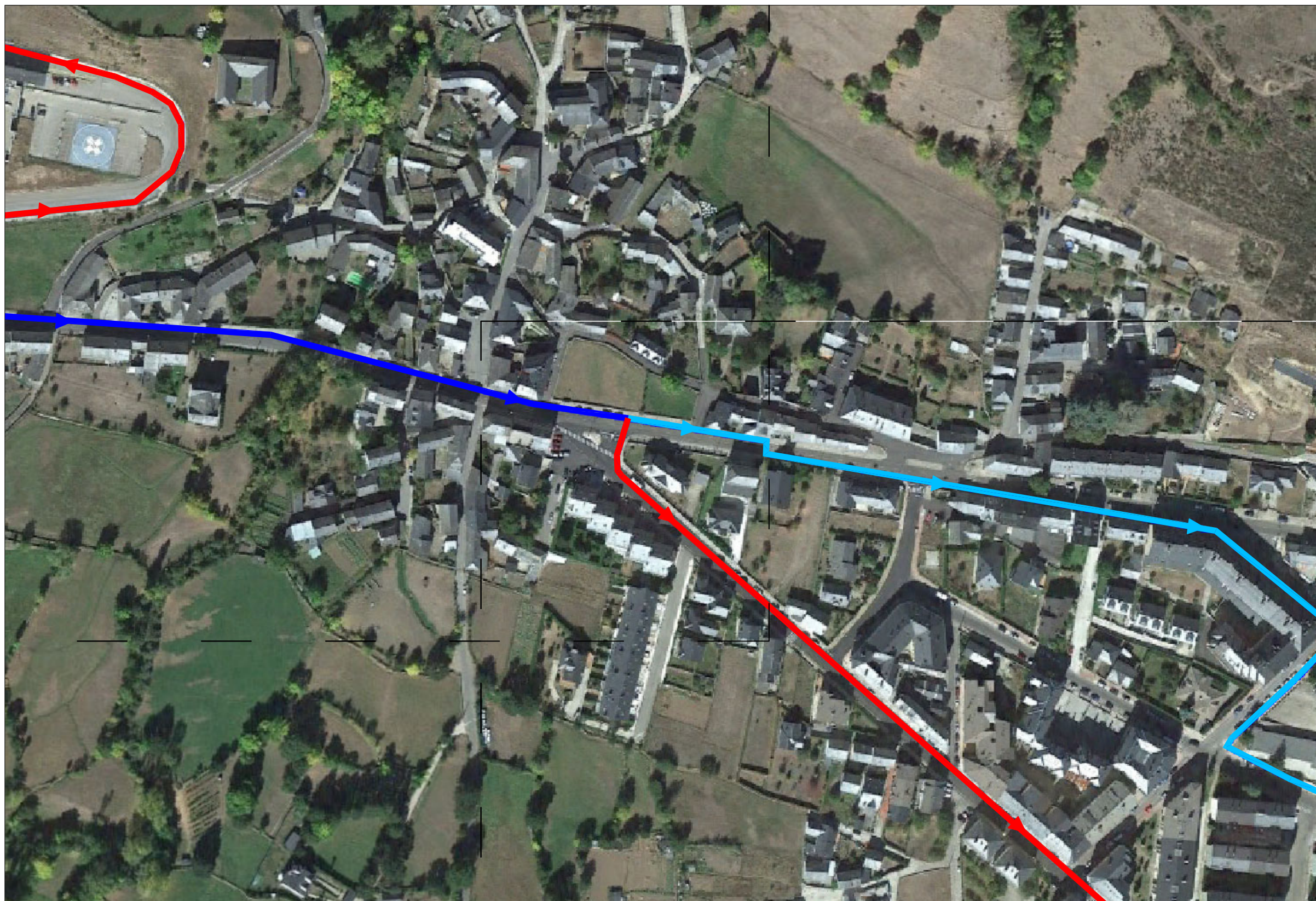


Centro de Salud

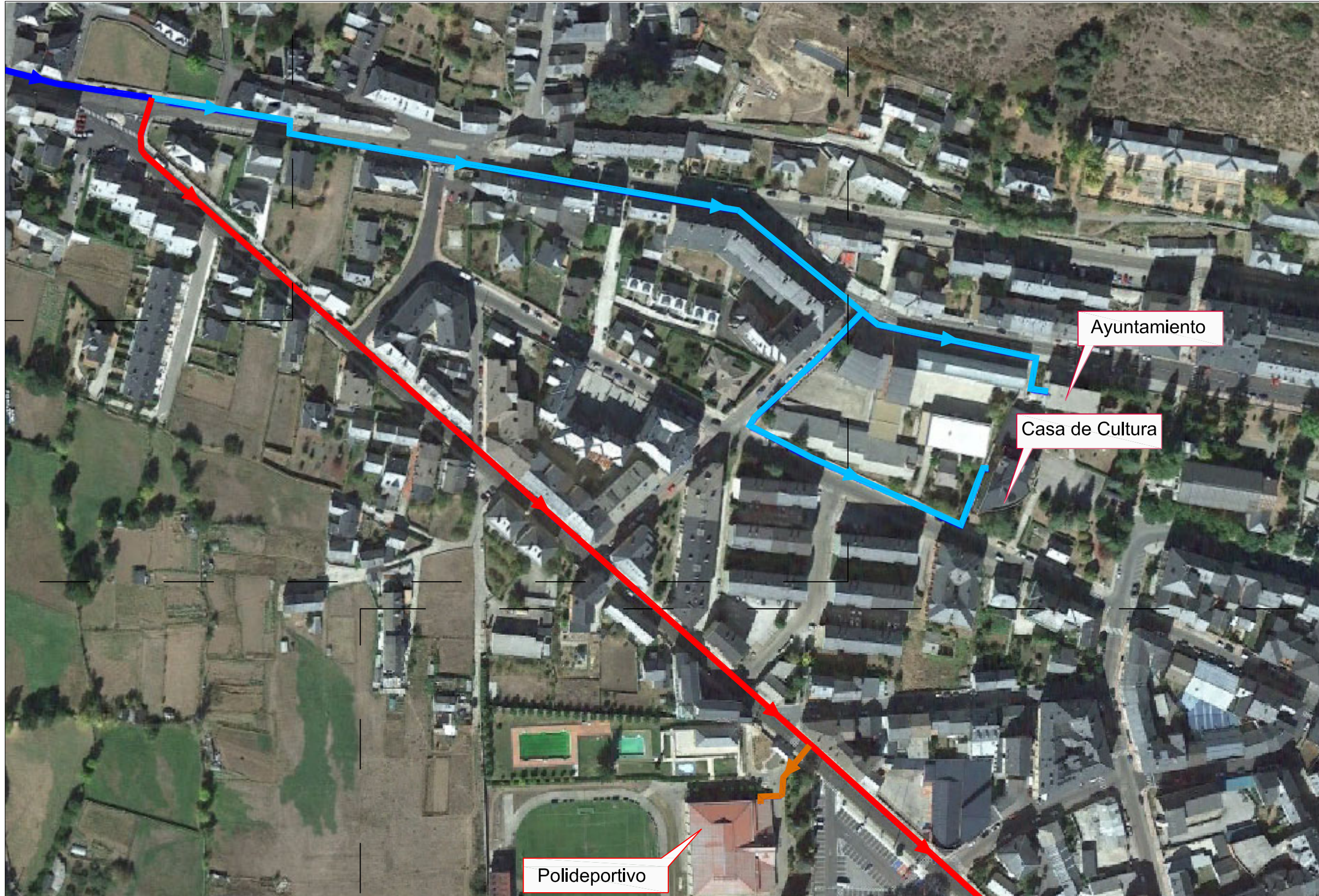
| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |



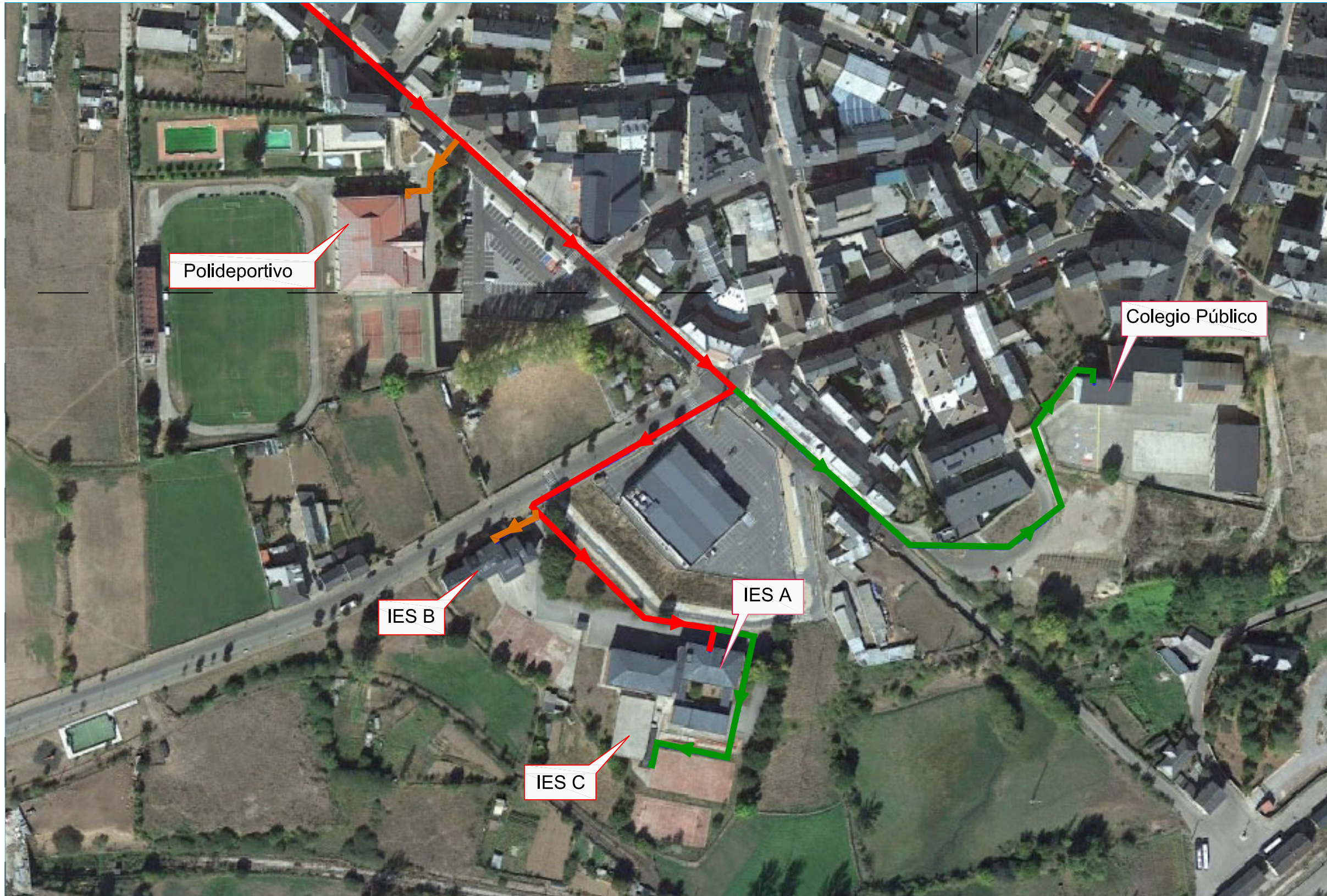




| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |

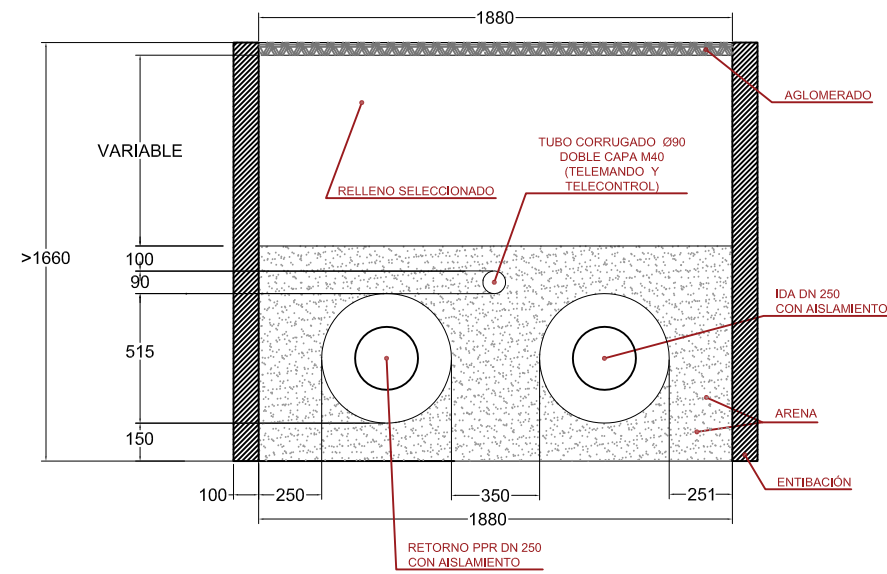


| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">█</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">█</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">█</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">█</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">█</span> | Ø 90 PPR  |

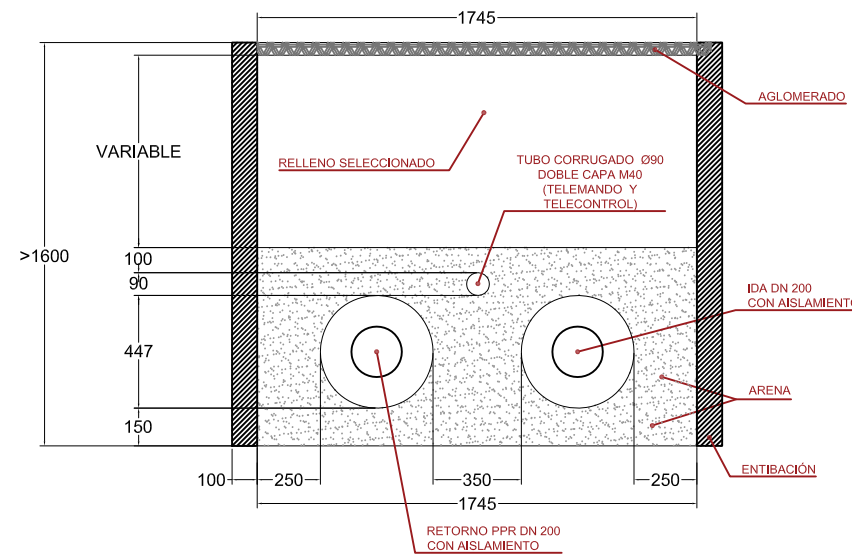


| LEYENDA                               |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <span style="color: blue;">—</span>   | Ø 250 PPR |
| <span style="color: red;">—</span>    | Ø 200 PPR |
| <span style="color: green;">—</span>  | Ø 125 PPR |
| <span style="color: cyan;">—</span>   | Ø 110 PPR |
| <span style="color: orange;">—</span> | Ø 90 PPR  |

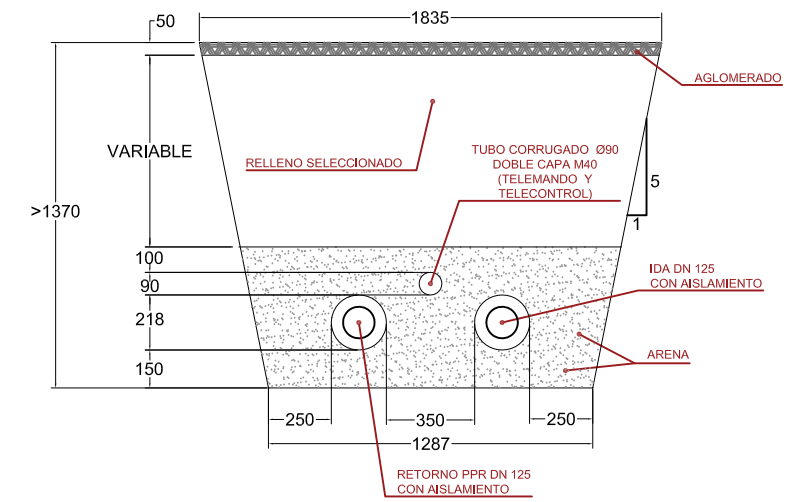
Tipo 1 - Zanja por zona con pavimento aglomerado



Tubería Ø250 con aislamiento

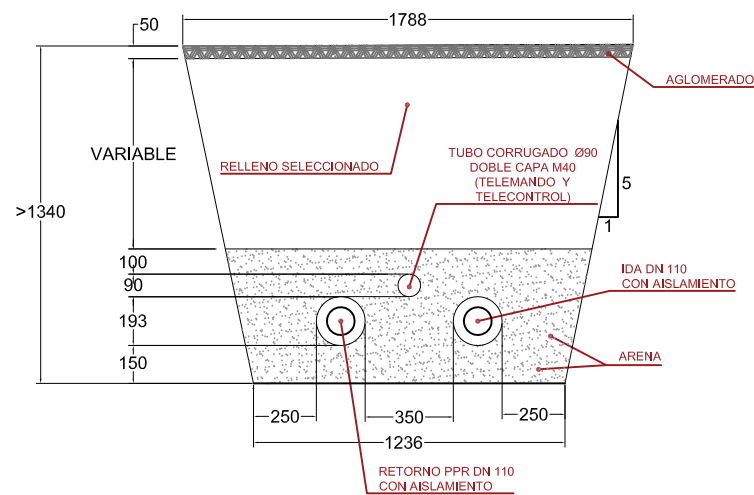


Tubería Ø200 con aislamiento

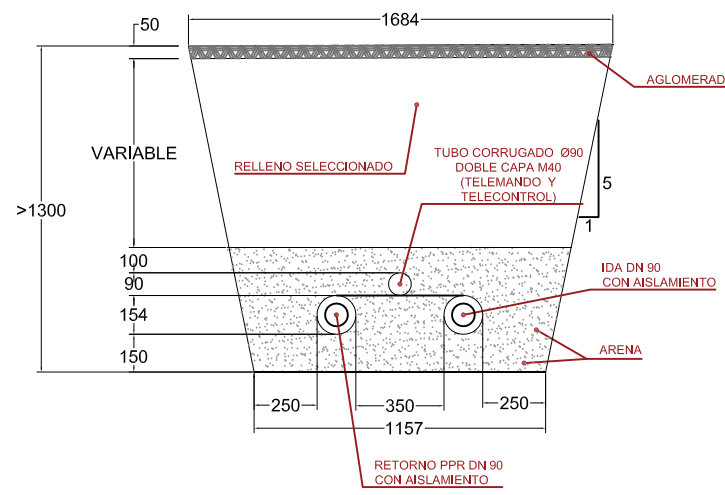


Tubería Ø125 con aislamiento

Tipo 1 - Zanja por zona con pavimento aglomerado

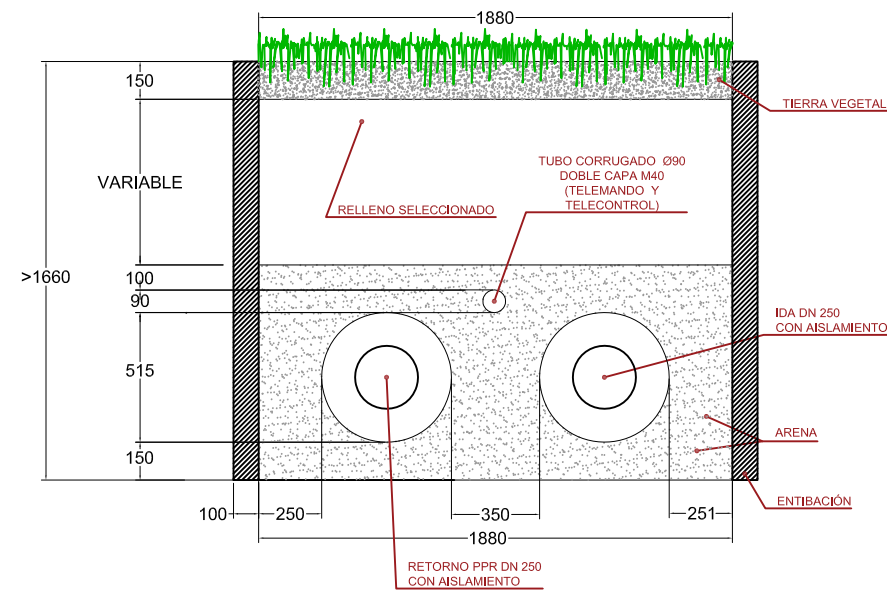


Tubería Ø110 con aislamiento

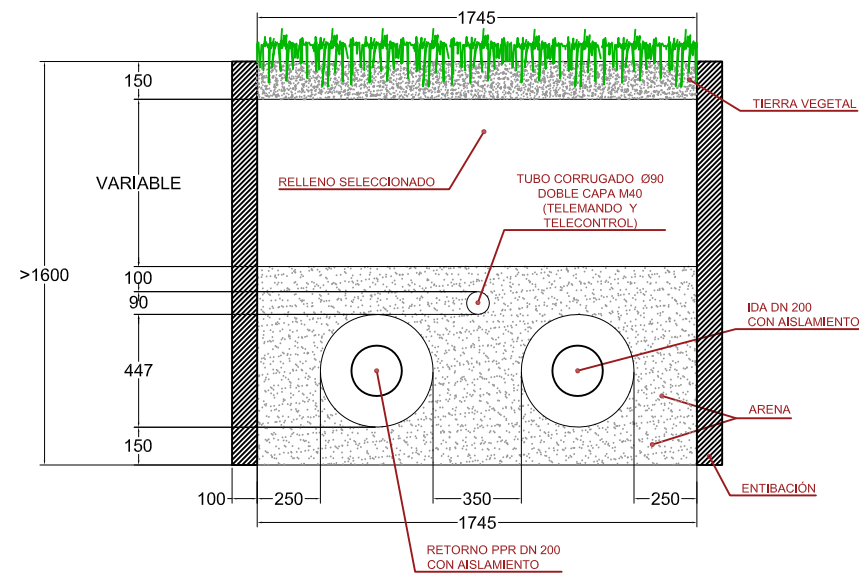


Tubería Ø 90 con aislamiento

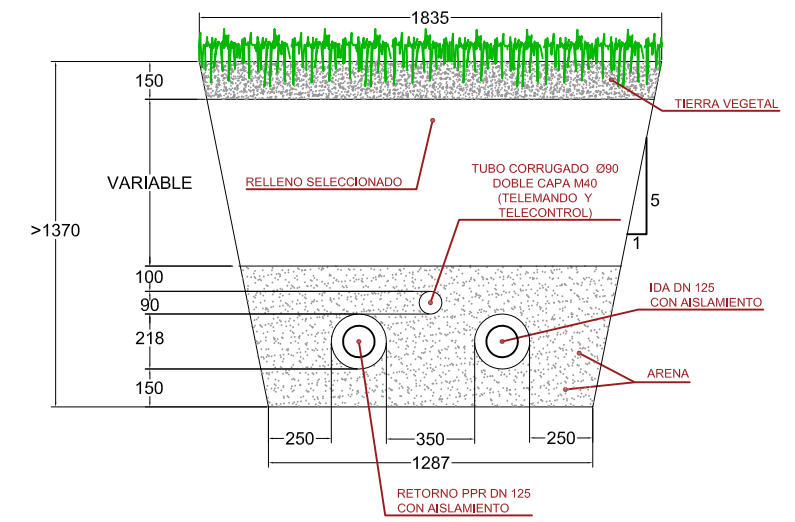
### Tipo 2 - Zanja por zona con vegetación



Tubería Ø250 con aislamiento

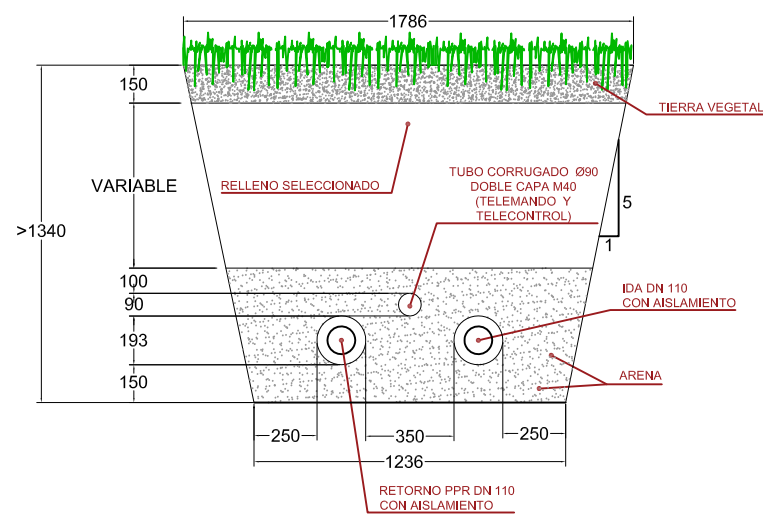


Tubería Ø200 con aislamiento

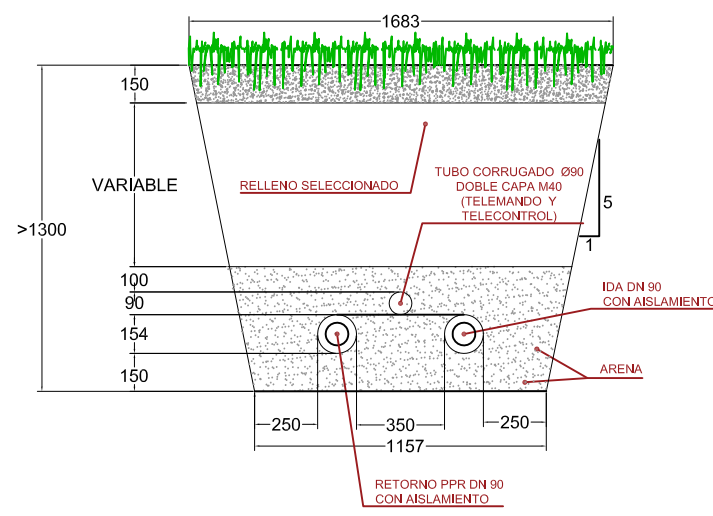


Tubería Ø125 con aislamiento

### Tipo 2 - Zanja por zona con vegetación

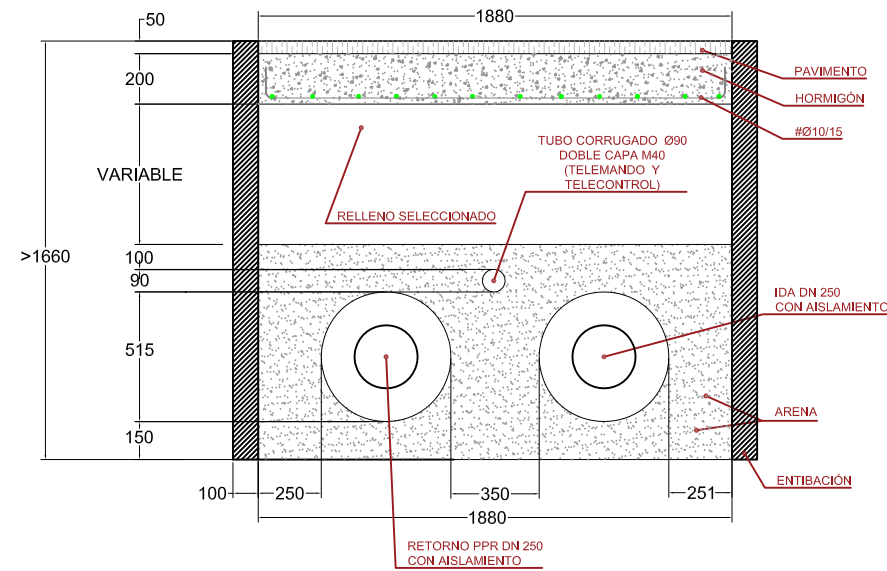


Tubería Ø110 con aislamiento

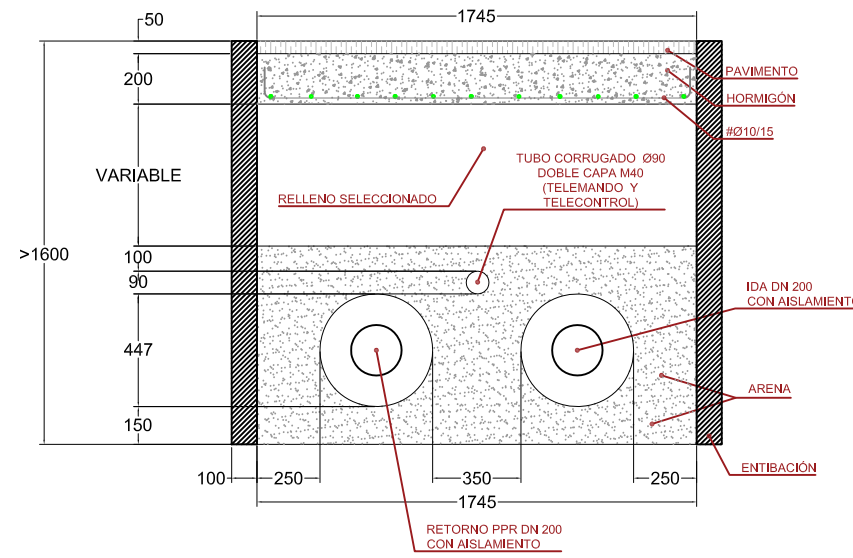


Tubería Ø 90 con aislamiento

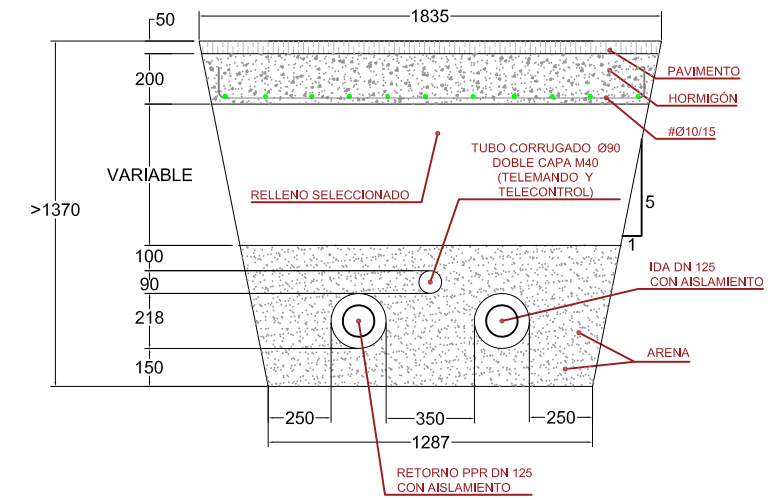
Tipo 3 - Zanja por zona con pavimento, acera o losa de hormigón



Tubería Ø250 con aislamiento

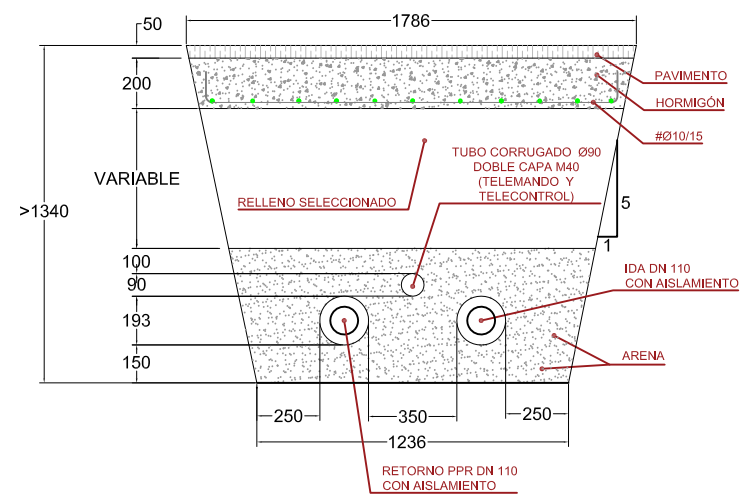


Tubería Ø200 con aislamiento

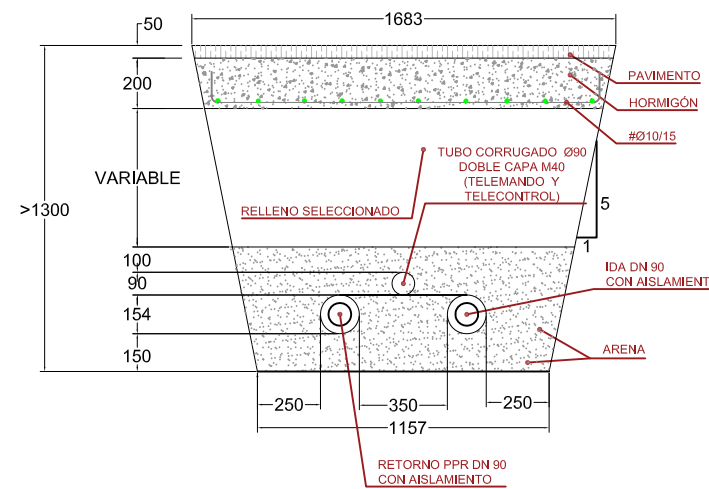


Tubería Ø125 con aislamiento

Tipo 3 - Zanja por zona con pavimento, acera o losa de hormigón

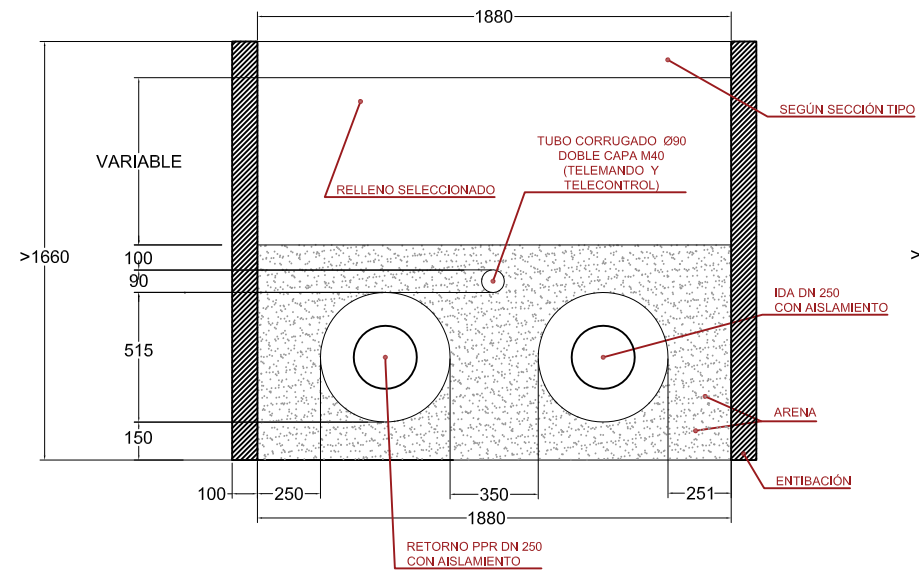


Tubería Ø110 con aislamiento

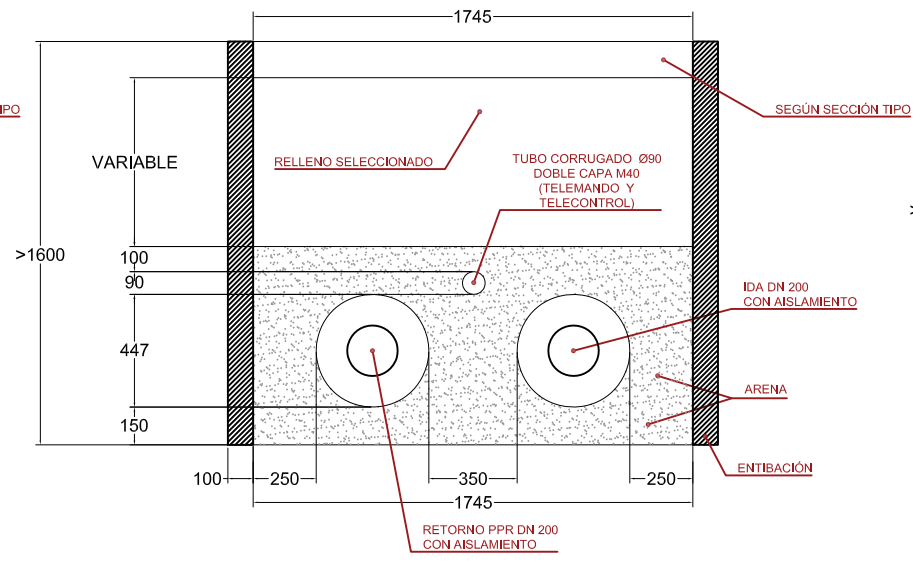


Tubería Ø 90 con aislamiento

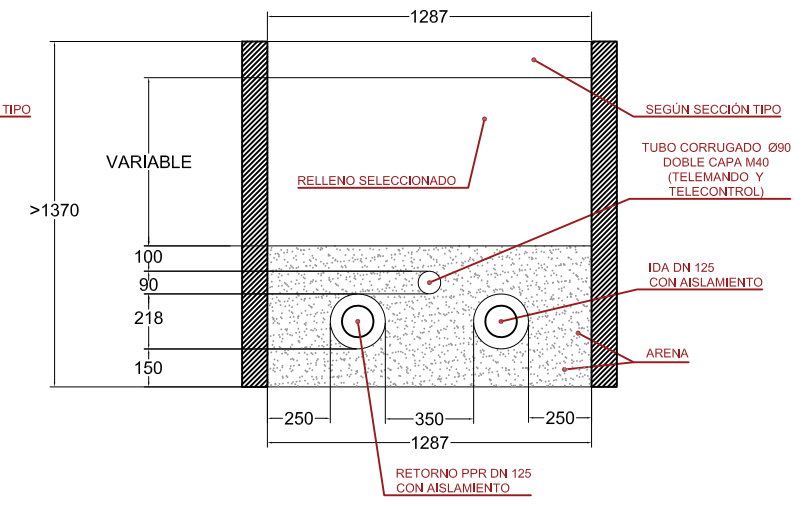
Tipo 4 - Zanja entibada en cualquier tipo de zona



Tubería Ø250 con aislamiento

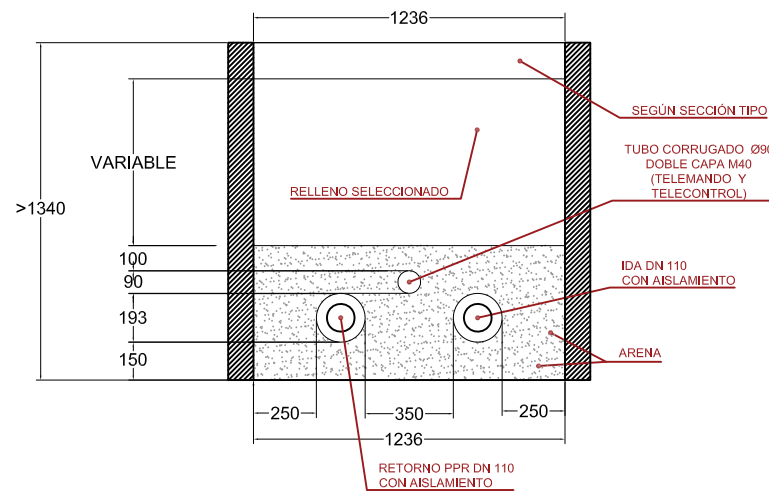


Tubería Ø200 con aislamiento

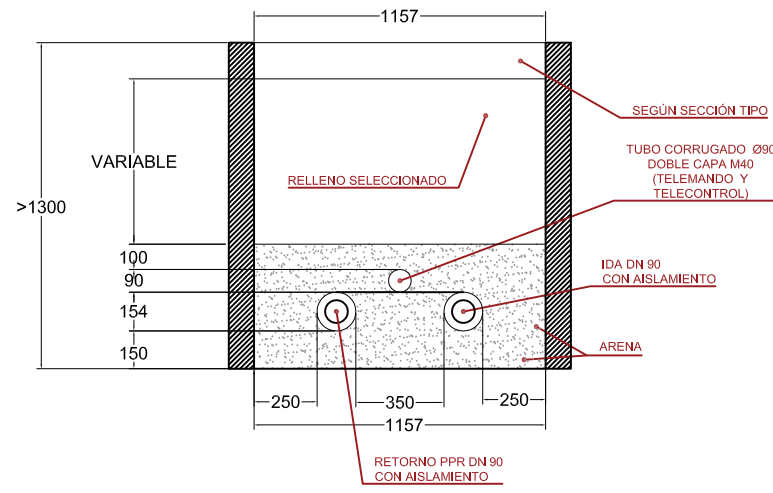


Tubería Ø125 con aislamiento

Tipo 4 - Zanja entibada en cualquier tipo de zona



Tubería Ø110 con aislamiento



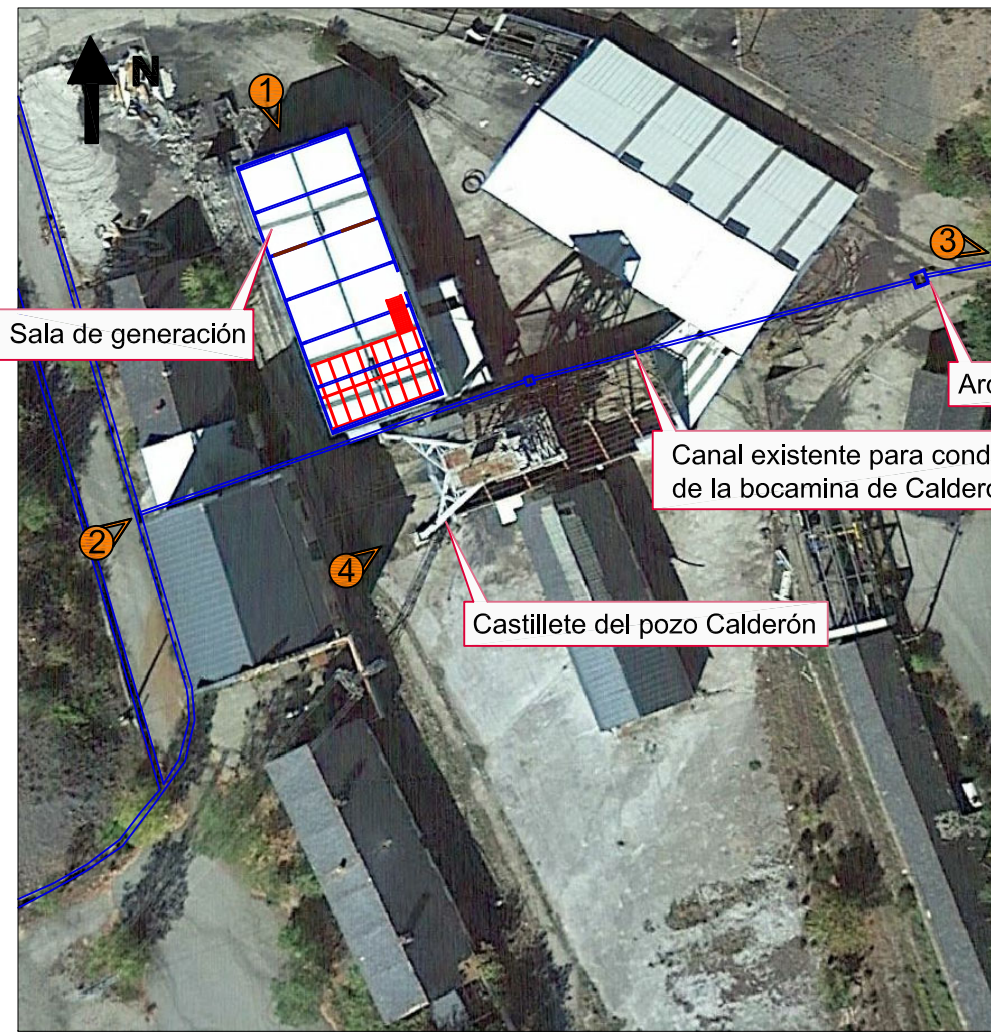
Tubería Ø 90 con aislamiento



Imagen 1



Imagen 2



Escala 1:1.000

Bocamina de la mina de montaña de Calderón

Arqueta de conducción de drenajes

Canal existente para conducir los drenajes de la bocamina de Calderón

Castillete del pozo Calderón



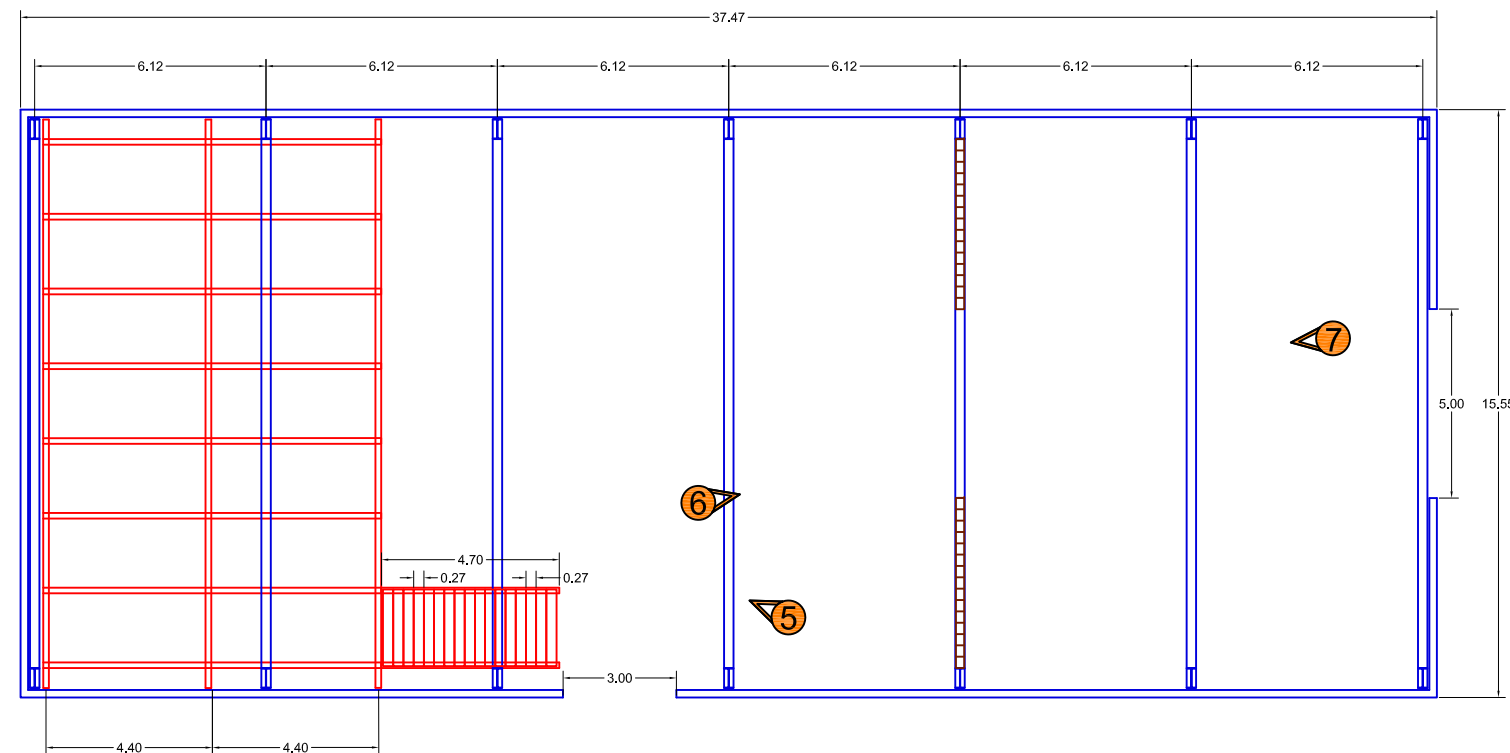
Imagen 3



Imagen 4



Imagen 5



Situación actual de la sala de generación

Escala 1:200



Imagen 6

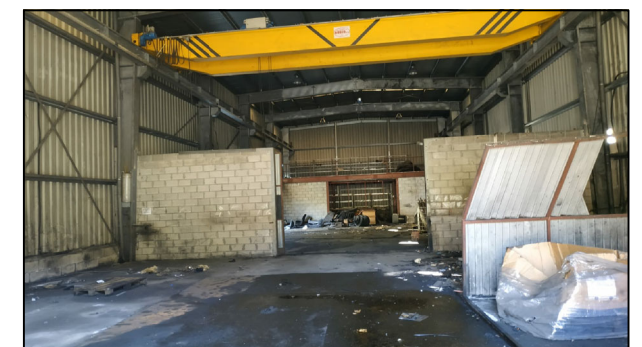
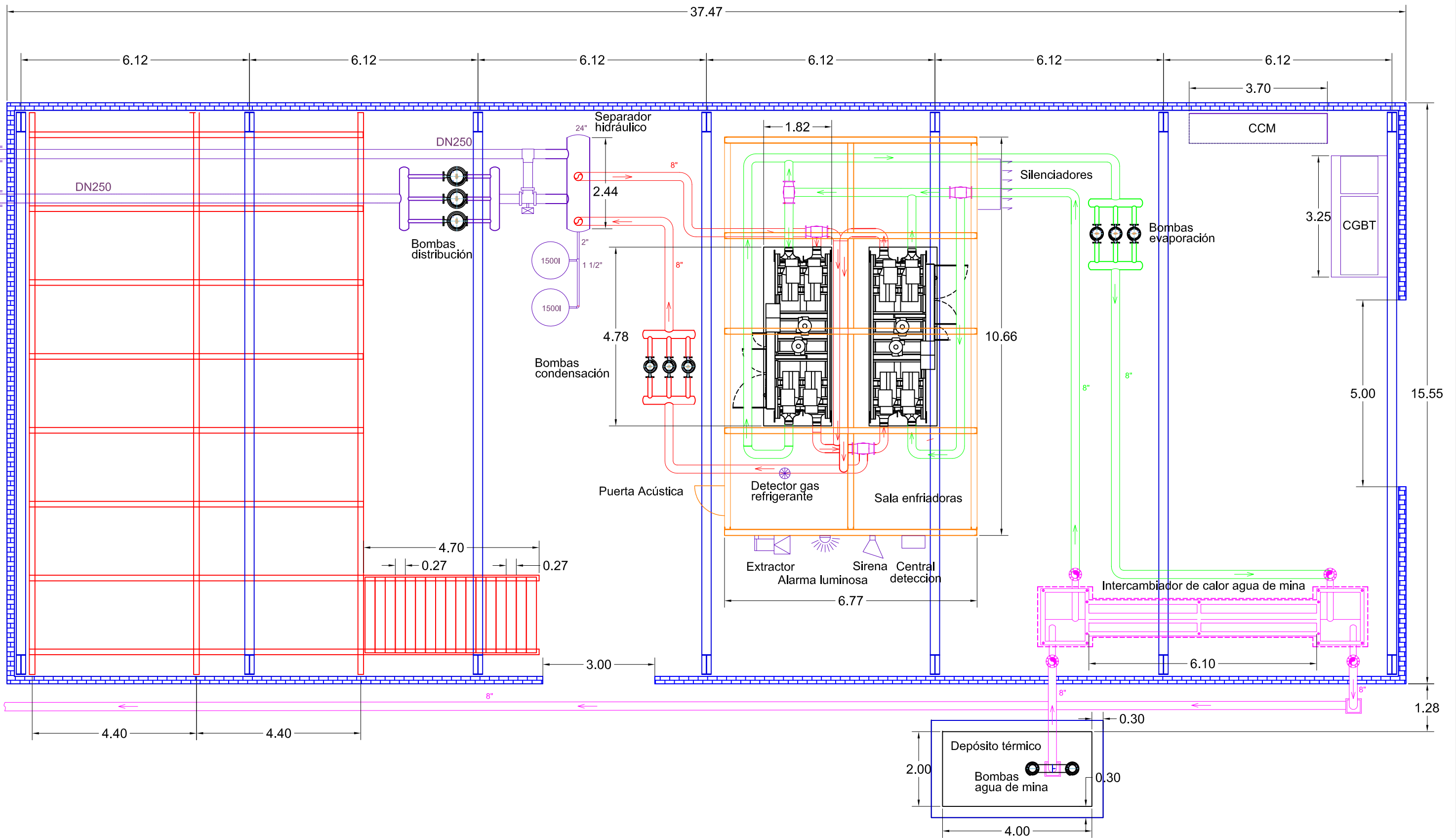
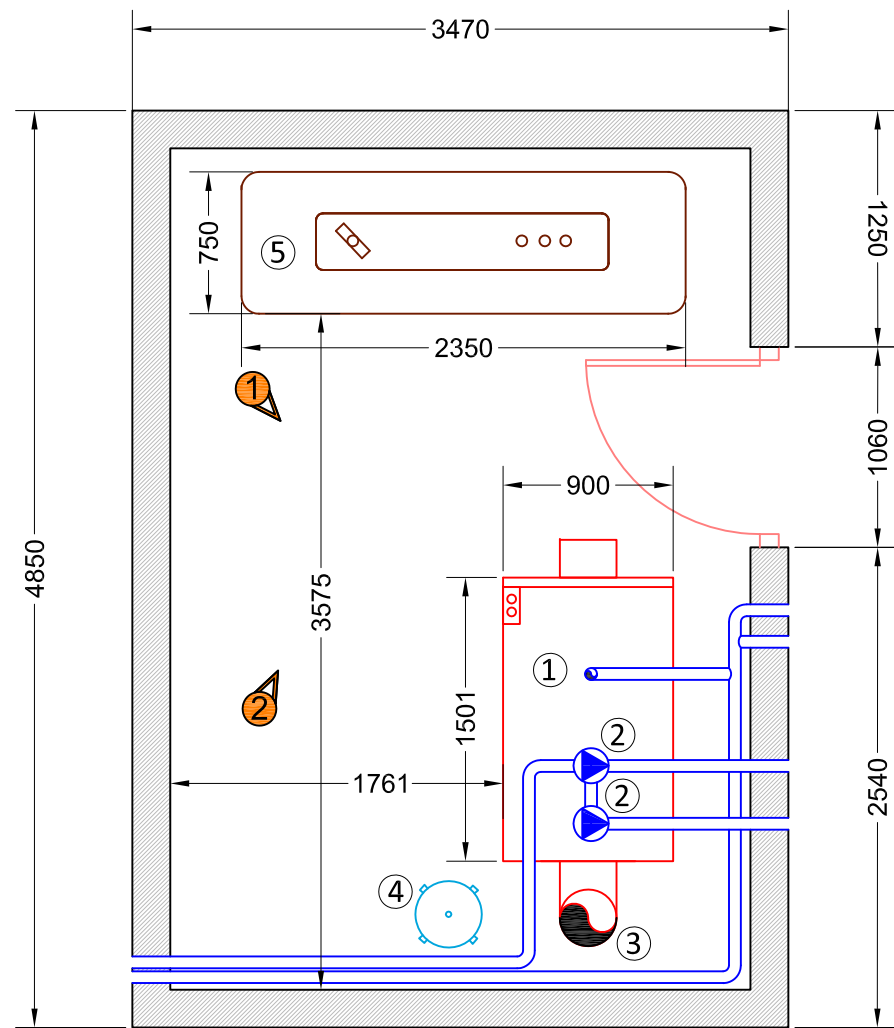


Imagen 7

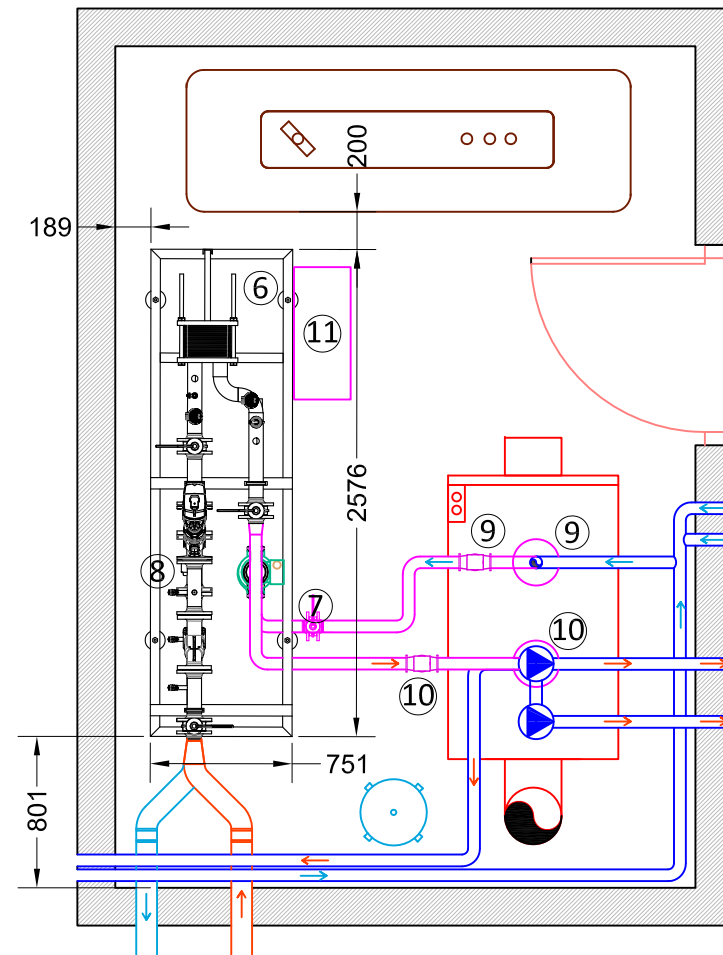








Estado actual



Estado reformado

- LEYENDA**
- ① Caldera de gasoil de 127,2 kW
  - ② Bombas de impulsión
  - ③ Conducto de extracción de la caldera
  - ④ Vaso de expansión de 50 l
  - ⑤ Depósito de gasoil
  - ⑥ Subestación térmica de 127,2 kW
  - ⑦ Bomba recirculadora
  - ⑧ Válvula micrométrica de regulación de la red
  - ⑨ Válvulas de control en retorno (Bypass caldera)
  - ⑩ Válvulas de control en ida (Bypass caldera)
  - ⑪ Cuadro eléctrico geotermia
  - Conducciones existentes
  - Conducciones proyectadas
  - Conducción de ida de la red de calor
  - Conducción de retorno de la red de calor
  - ← Sentido del flujo de agua caliente
  - Sentido del flujo de agua fría



Figura 1



Figura 2

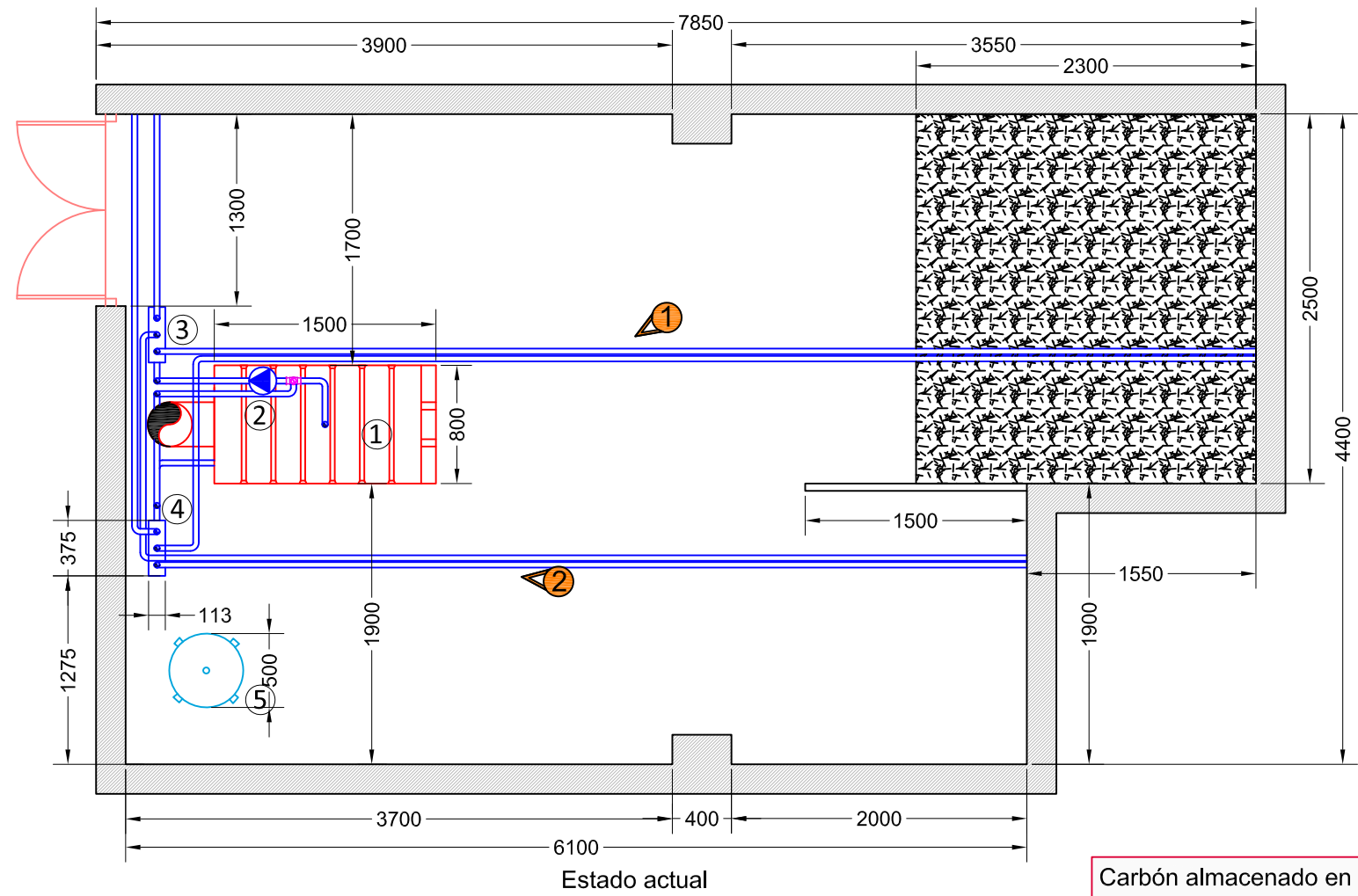
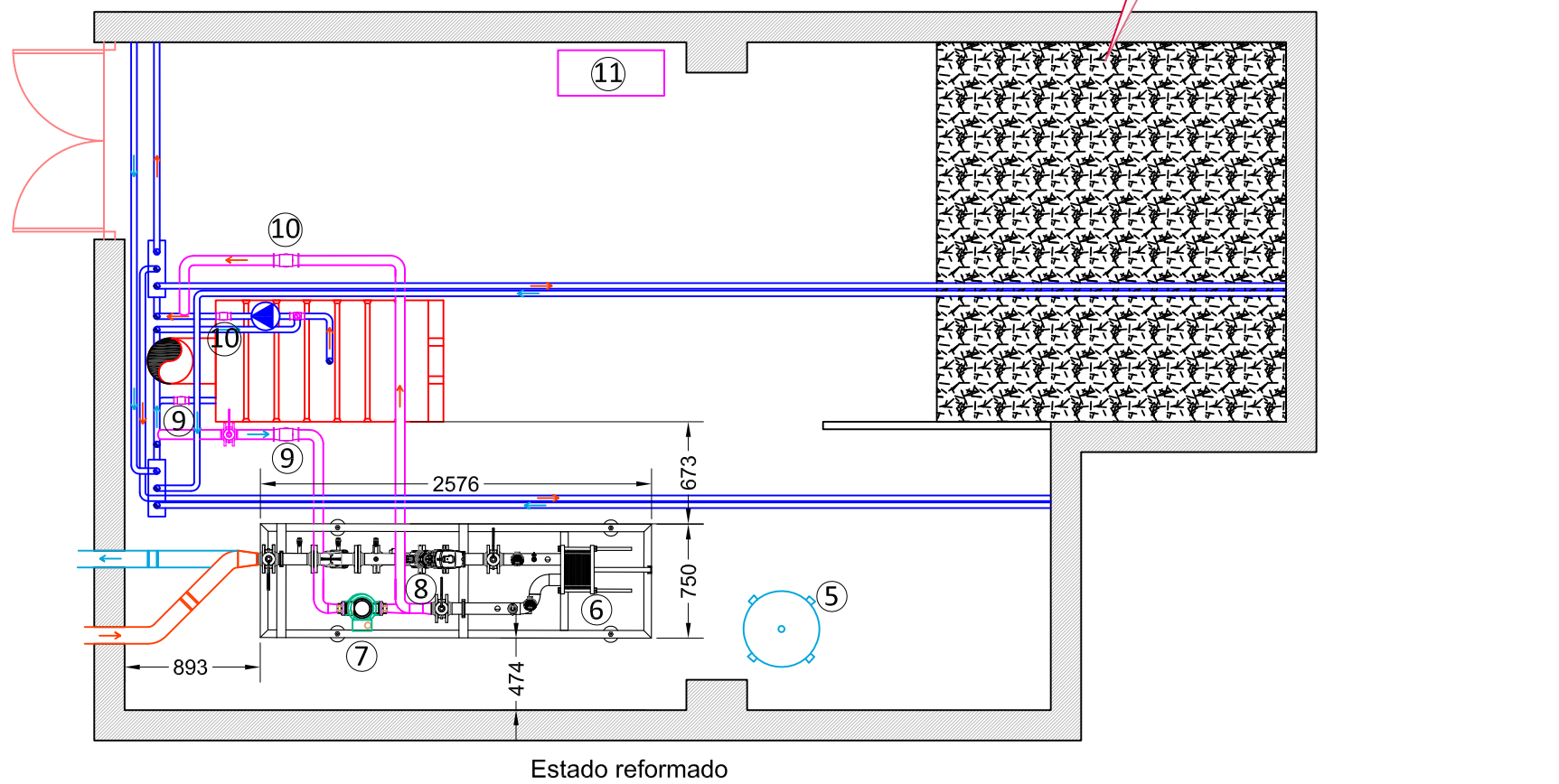


Figura 1



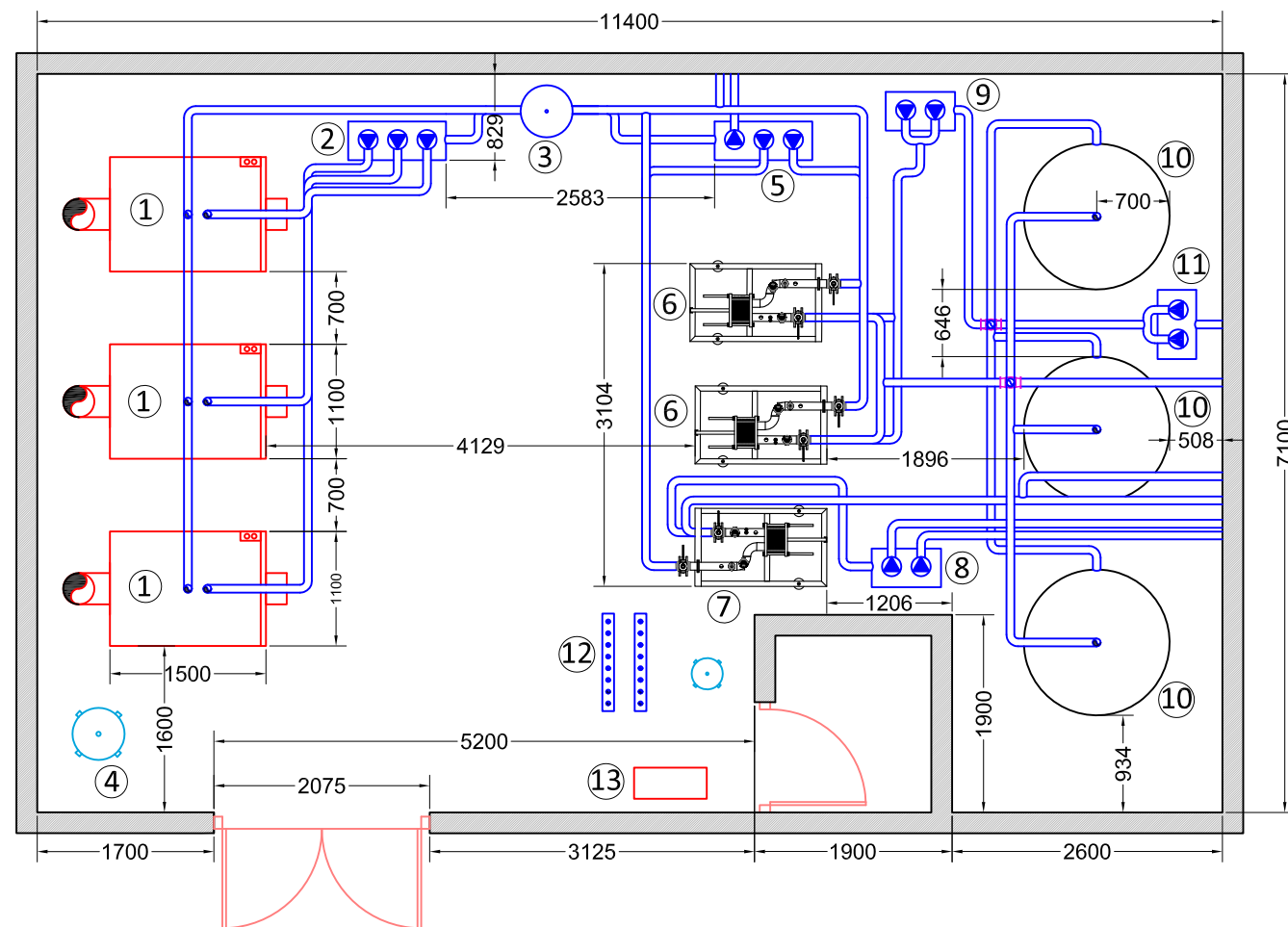
Figura 2



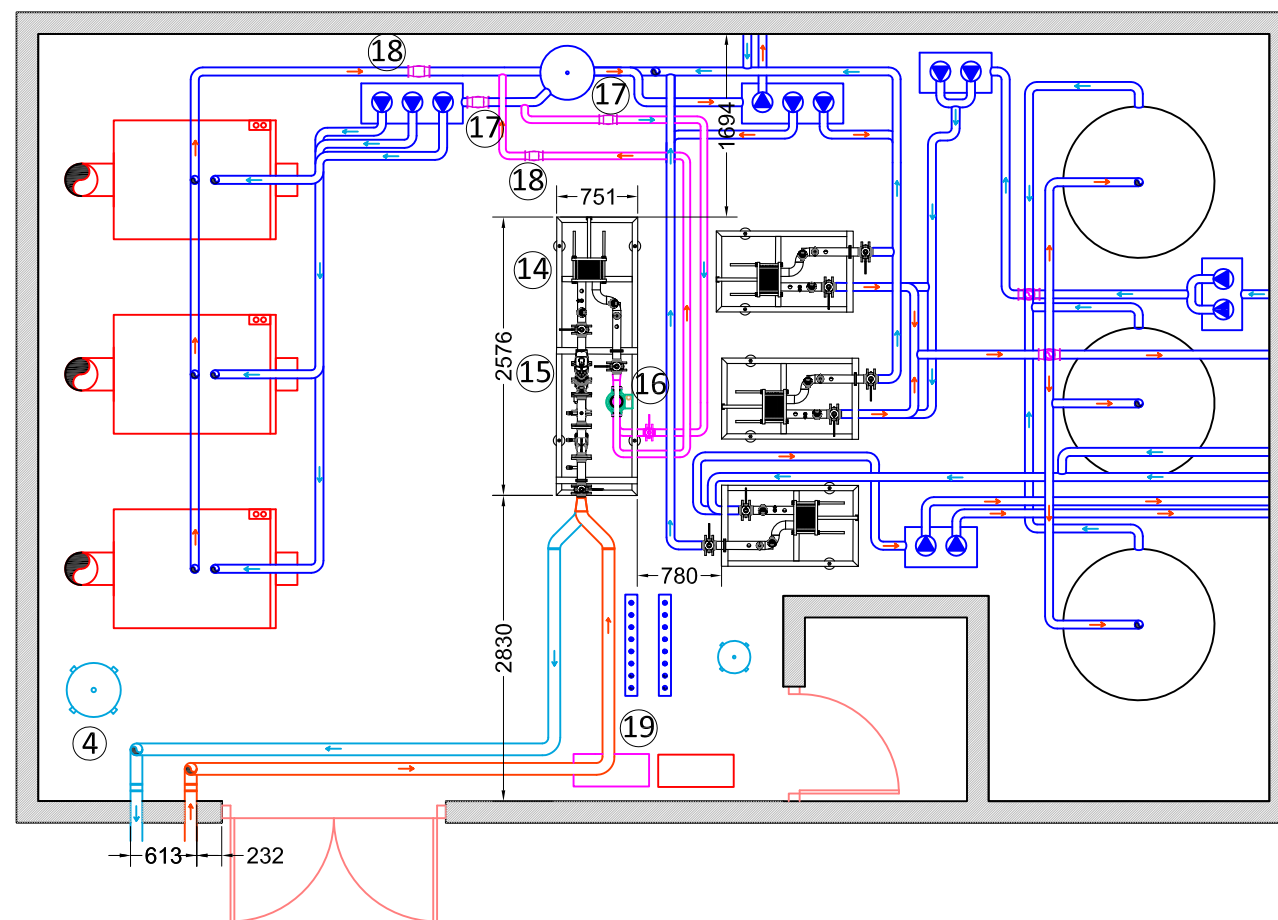
LEYENDA

- ① Caldera de gasoil de 107,18 kW
- ② Bomba de impulsión
- ③ Conducto de extracción de la caldera
- ④ Vaso de expansión de 200 l
- ⑤ Depósito de gasoil
- ⑥ Subestación térmica de 107,18 kW
- ⑦ Bomba recirculadora
- ⑧ Válvula micrométrica de regulación de la red
- ⑨ Válvulas de control en retorno (Bypass caldera)
- ⑩ Válvulas de control en ida (Bypass caldera)
- ⑪ Cuadro eléctrico geotermia
- Conducciones existentes
- Conducciones proyectadas
- Conducción de ida de la red de calor
- Conducción de retorno de la red de calor
- ← Sentido del flujo de agua caliente
- Sentido del flujo de agua fría





Estado actual

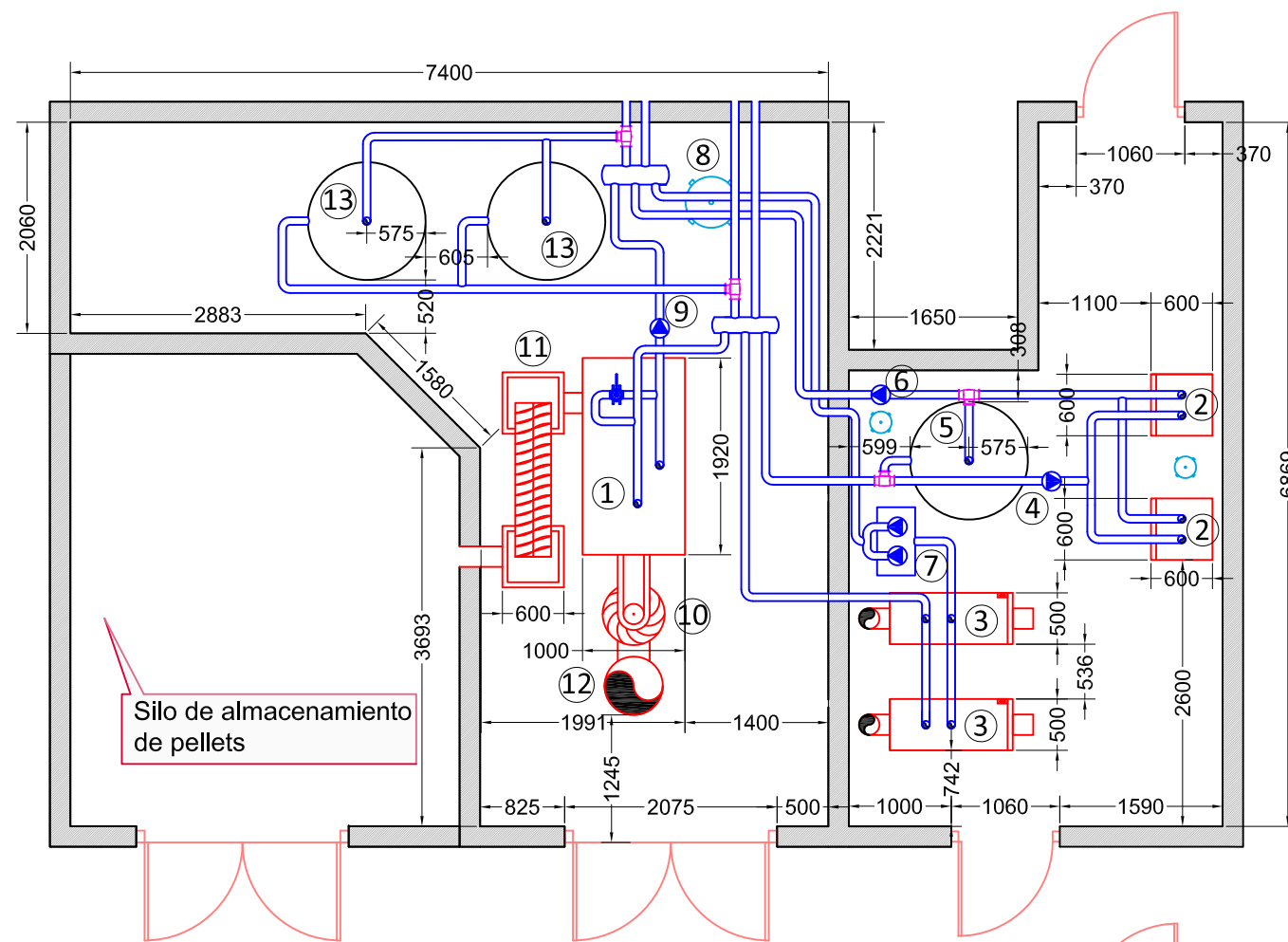


Estado reformado

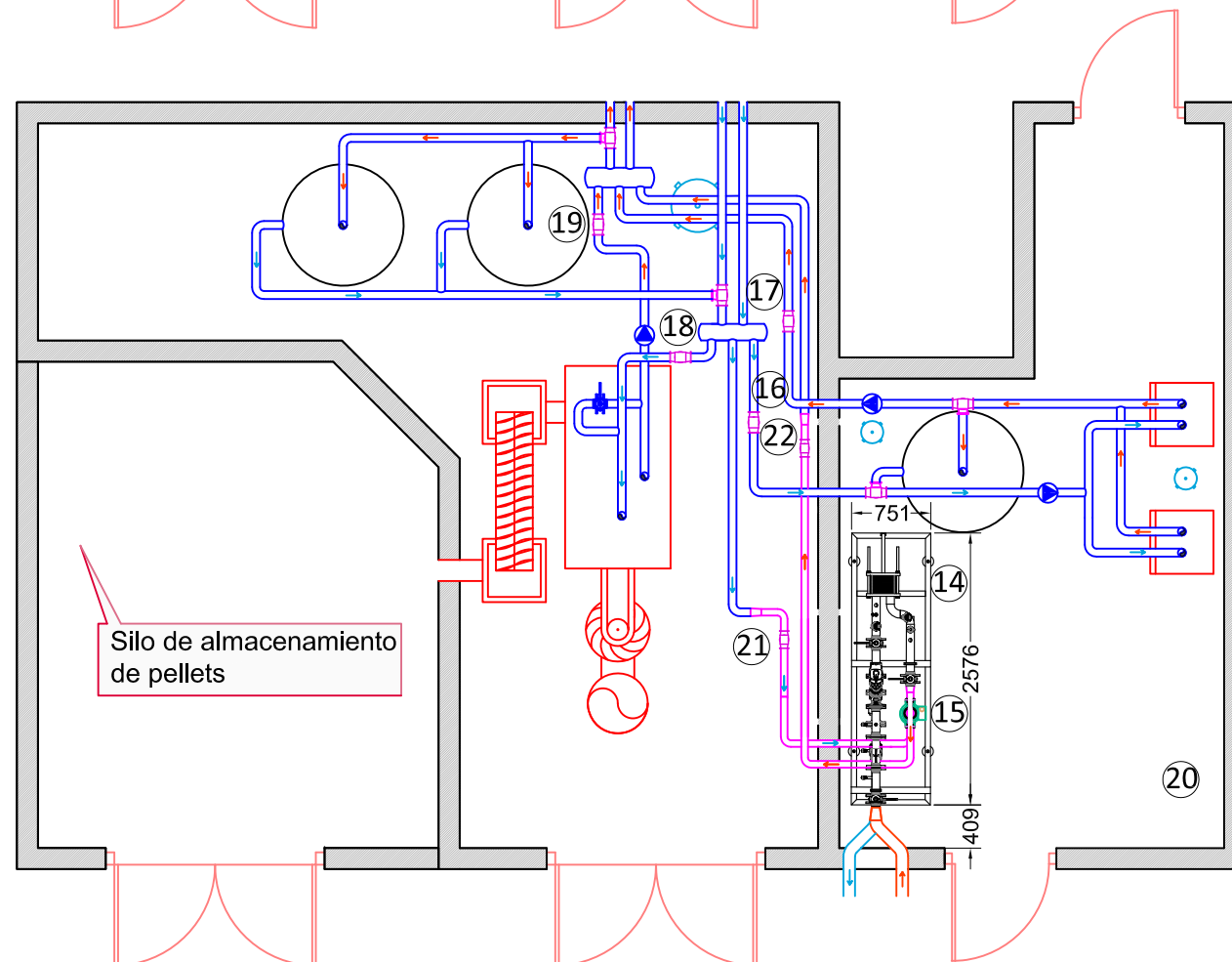
LEYENDA

- ① Calderas de gasoil de 319,8 kW
- ② Bombas de impulsión circuito calderas
- ③ Separador hidráulico
- ④ Vaso de expansión de 700 l
- ⑤ Bombas de impulsión de intercambiadores
- ⑥ Intercambiador de calor de ACS
- ⑦ Intercambiador de calor de calefacción
- ⑧ Bombas de impulsión circuito calefacción
- ⑨ Bombas de impulsión interacumuladores ACS
- ⑩ Depósito de ACS de 3.000 l
- ⑪ Bombas de impulsión circuito ACS
- ⑫ Purgas de circuitos
- ⑬ Cuadro eléctrico existente
- ⑭ Subestación de intercambio de 1.031,2 kW
- ⑮ Válvula micrométrica de regulación de la red
- ⑯ Bomba recirculadora
- ⑰ Válvulas de control en retorno (Bypass caldera)
- ⑱ Válvulas de control en ida (Bypass caldera)
- ⑲ Cuadro eléctrico geotermia
- Conducciones existentes
- Conducciones proyectadas
- Conducción de ida de la red de calor
- Conducción de retorno de la red de calor
- Sentido del flujo de agua caliente
- Sentido del flujo de agua fría





Estado actual

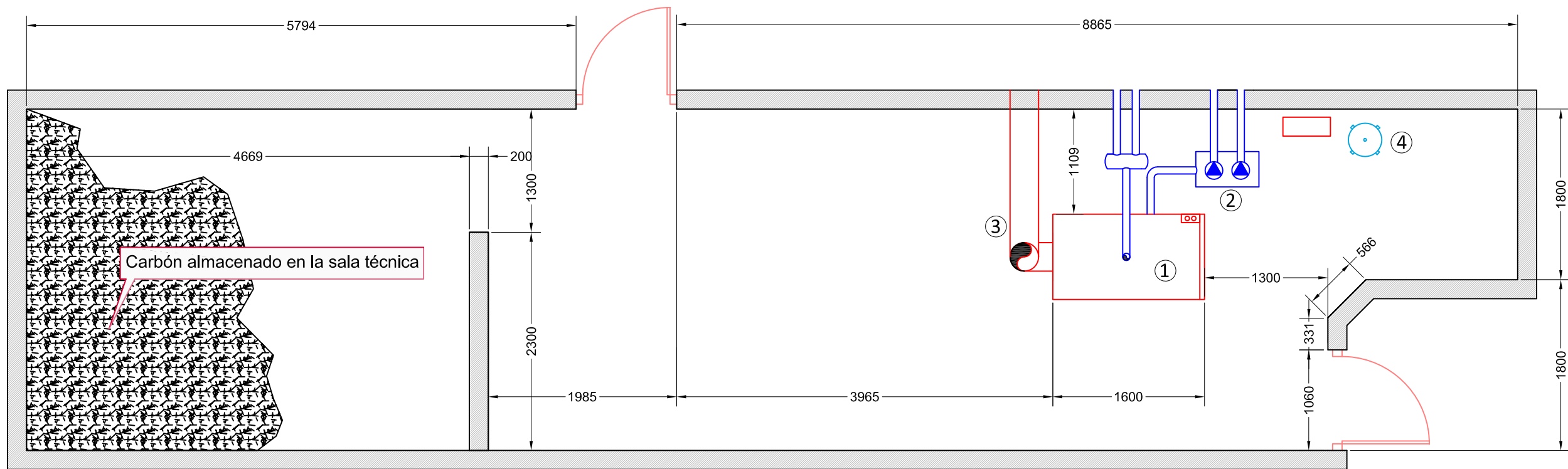


Estado reformado

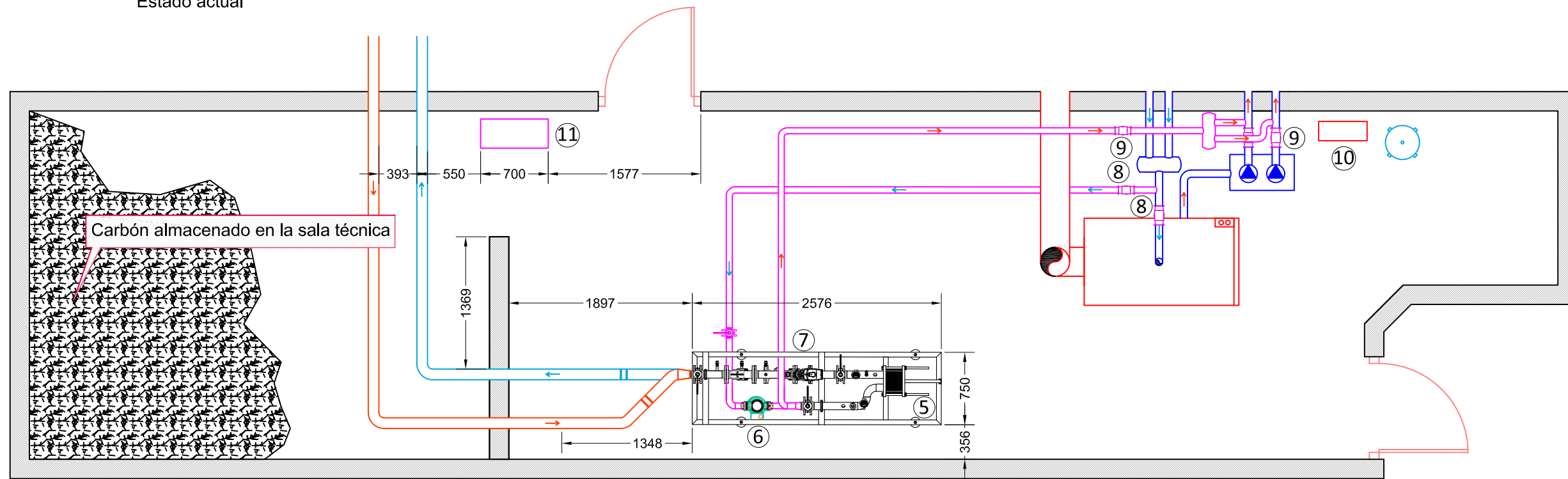
LEYENDA

- ① Caldera de biomasa de 250 kW
- ② Calderas de gasoil en uso
- ③ Calderas de gasoil en desuso
- ④ Bombas de impulsión calderas - interacum.
- ⑤ Interacumulador 1.500 l calderas de gasoil
- ⑥ Bombas de impulsión calderas - circuito
- ⑦ Bombas de impulsión calderas en desuso
- ⑧ Vaso de expansión de 300 l
- ⑨ Bomba de impulsión caldera biomasa
- ⑩ Ciclón de la caldera de biomasa
- ⑪ Tornillo sinfin de alimentación de biomasa
- ⑫ Conducto de extracción caldera biomasa
- ⑬ Depósitos ACS 1.500 l caldera biomasa
- ⑭ Subestación de intercambio de 250 kW
- ⑮ Bomba recirculadora
- ⑯ Válvula de control retorno calderas gasoil
- ⑰ Válvula de control ida calderas gasoil
- ⑱ Válvula de control retorno caldera biomasa
- ⑲ Válvula de control ida caldera biomasa
- ⑳ Cuadro eléctrico geotermia
- ㉑ Válvula de control en retorno (Bypass inst.)
- ㉒ Válvula de control en ida (Bypass inst.)
- Conducciones existentes
- Conducciones proyectadas
- Conducción de ida de la red de calor
- Conducción de retorno de la red de calor
- ← Sentido del flujo de agua caliente
- Sentido del flujo de agua fría





Estado actual



Estado reformado

LEYENDA

- |  |   |  |
|--|---|--|
| ① Caldera de carbón de 176,7 kW        | ⑦ Válvula micrométrica de regulación de la red    | — Conducciones existentes                  |
| ② Bombas de impulsión                  | ⑧ Válvulas de control en retorno (Bypass caldera) | — Conducciones proyectadas                 |
| ③ Conducto de extracción de la caldera | ⑨ Válvulas de control en ida (Bypass caldera)     | — Conducción de ida de la red de calor     |
| ④ Vaso de expansión de 140 l           | ⑩ Cuadro eléctrico existente                      | — Conducción de retorno de la red de calor |
| ⑤ Subestación térmica de 176,7 kW      | ⑪ Cuadro eléctrico geotermia                      | ← Sentido del flujo de agua caliente       |
| ⑥ Bomba recirculadora                  |   | → Sentido del flujo de agua fría           |

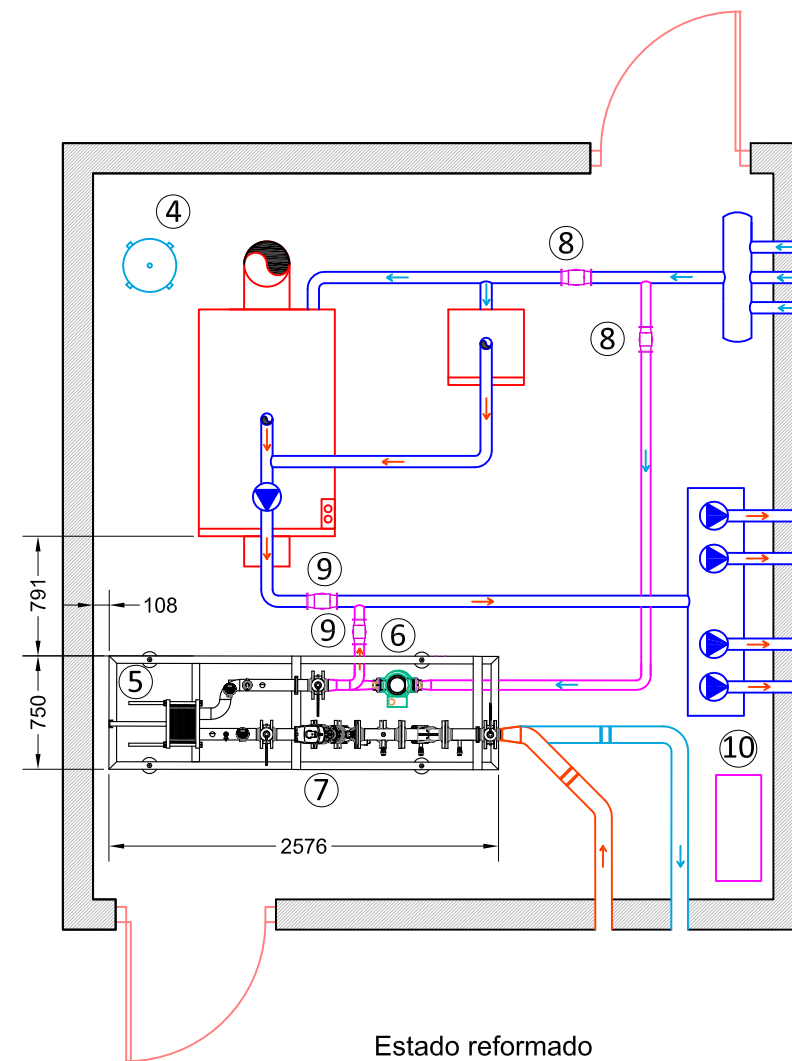
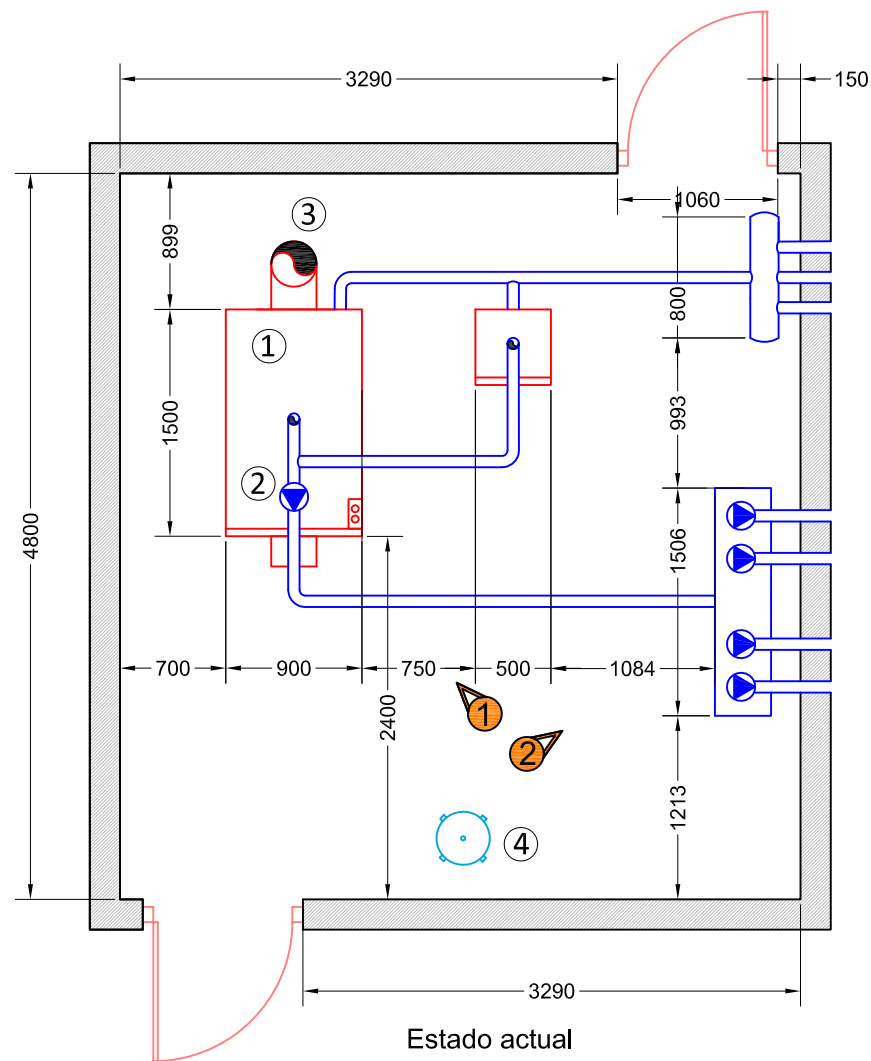


Figura 1



Figura 2

| LEYENDA |   |
|---------|---|
| ①       | Caldera de gasoil de 393 kW                     |
| ②       | Bomba de impulsión                              |
| ③       | Conducto de extracción de la caldera            |
| ④       | Vaso de expansión                               |
| ⑤       | Subestación de intercambio de 393 kW            |
| ⑥       | Bomba recirculadora                             |
| ⑦       | Válvula micrométrica de regulación de la red    |
| ⑧       | Válvulas de control en retorno (Bypass caldera) |
| ⑨       | Válvulas de control en ida (Bypass caldera)     |
| ⑩       | Cuadro eléctrico geotermia                      |
|         | Conducciones existentes                         |
|         | Conducciones proyectadas                        |
|         | Conducción de ida de la red de calor            |
|         | Conducción de retorno de la red de calor        |
|         | Sentido del flujo de agua caliente              |
|         | Sentido del flujo de agua fría                  |



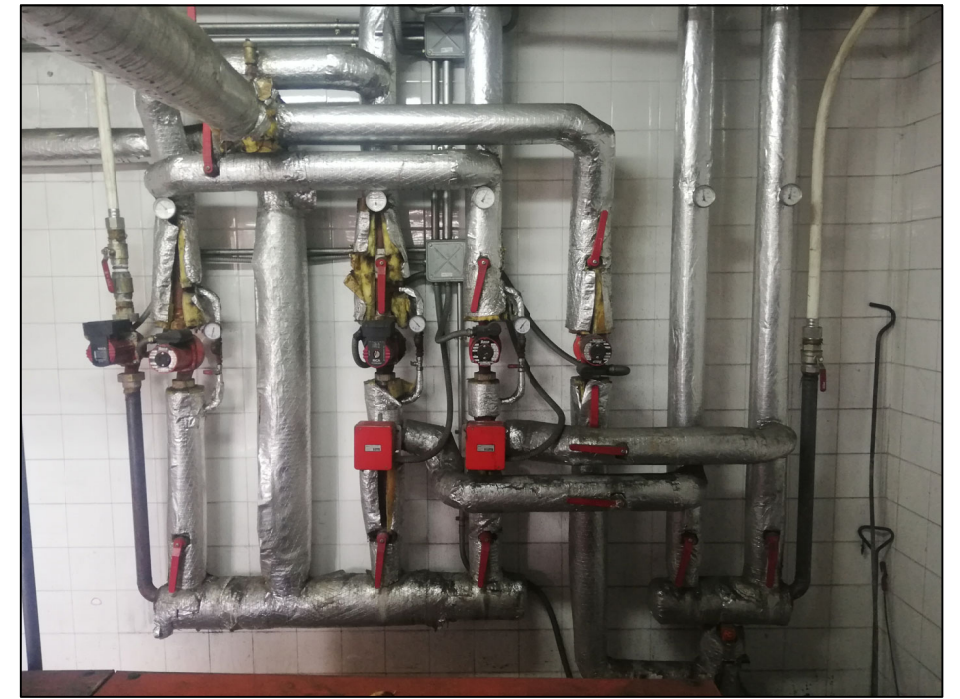
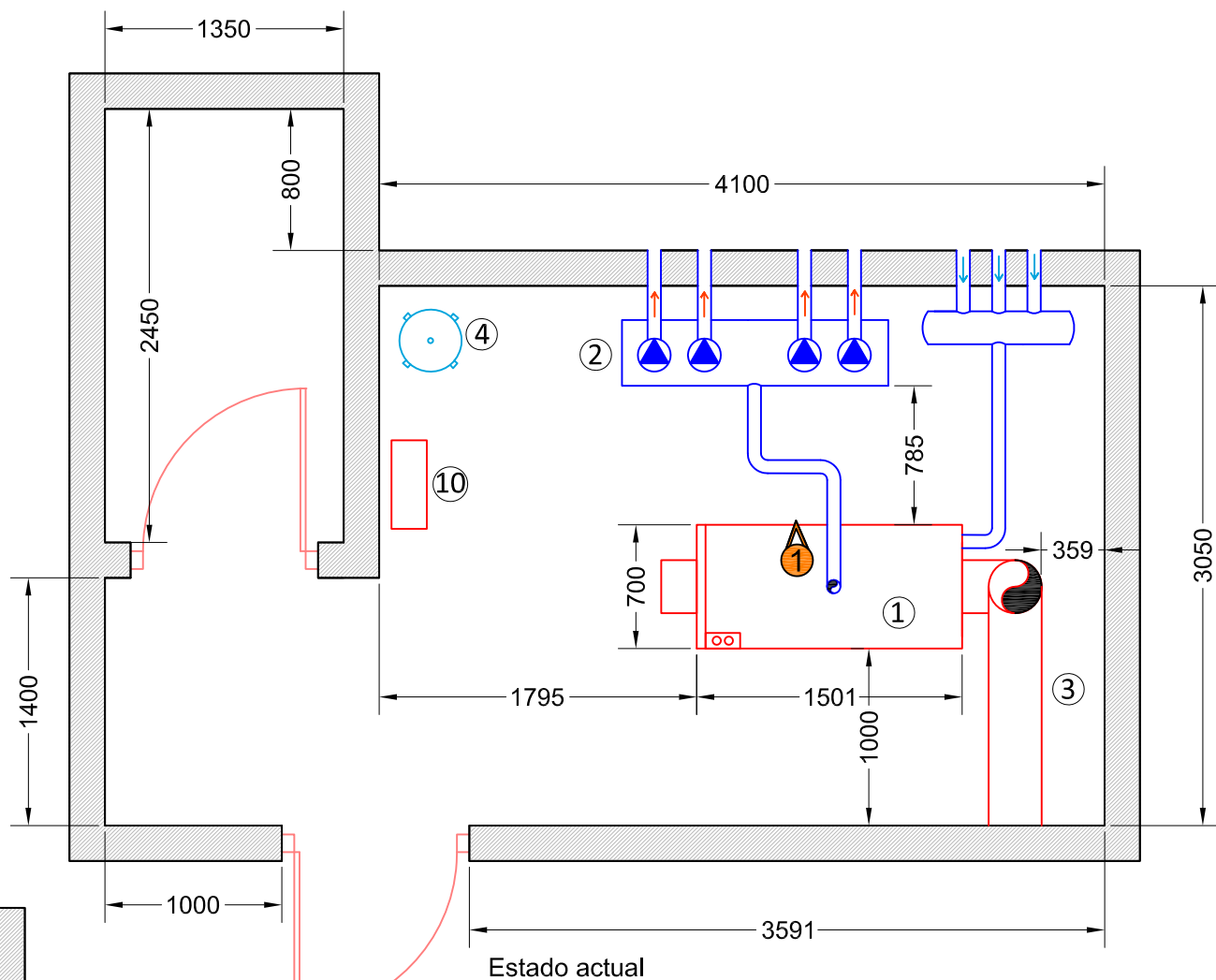
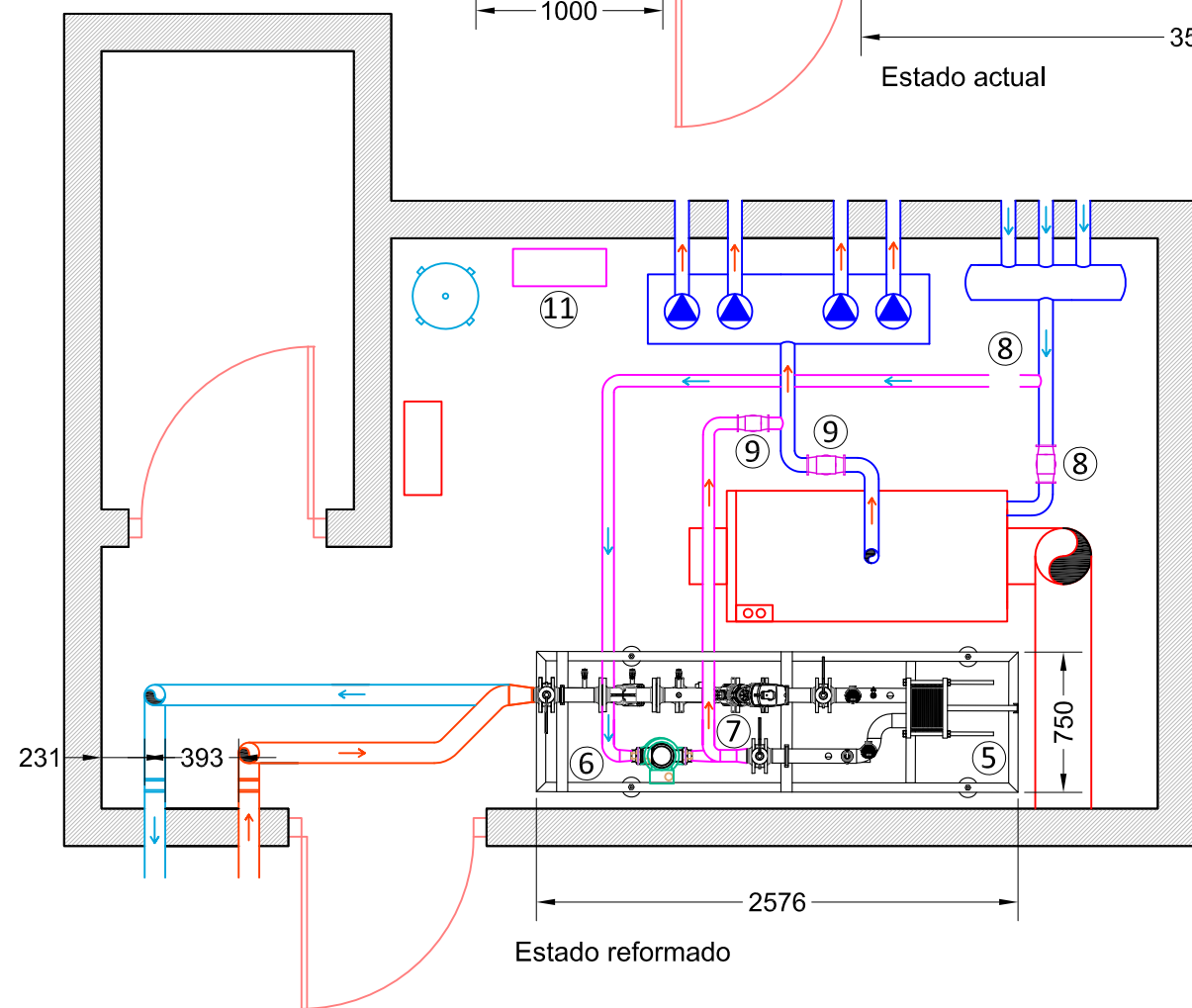
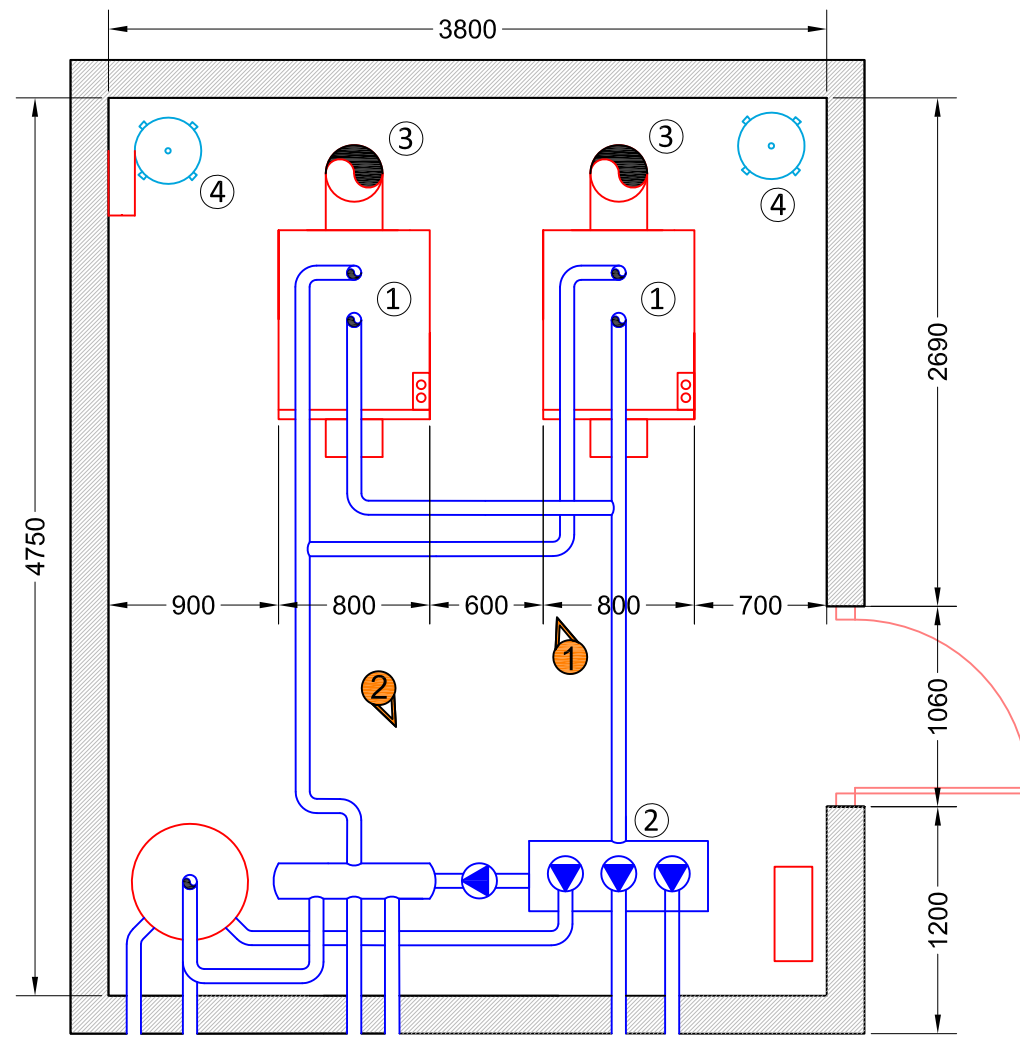


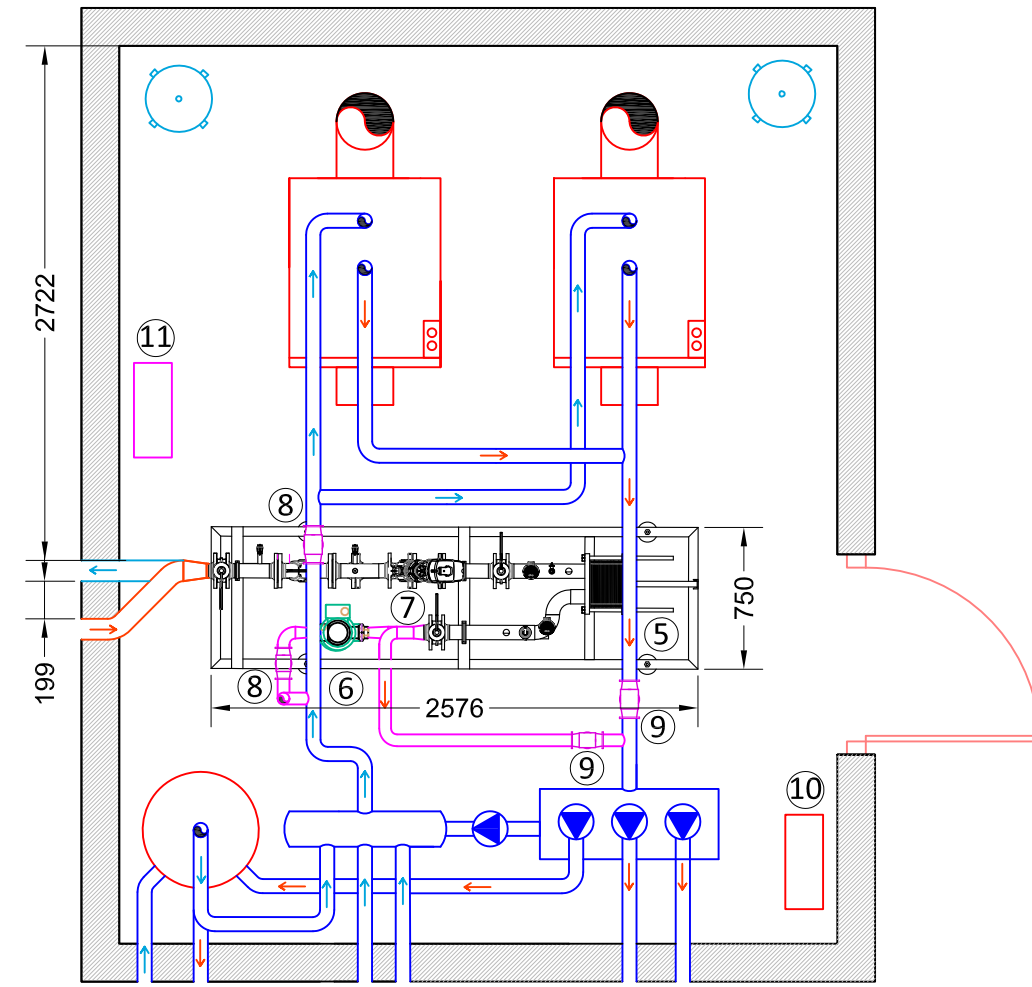
Figura 1



| LEYENDA |   |
|---------|---|
| ①       | Caldera de gasoil de 192 kW                     |
| ②       | Bombas de impulsión                             |
| ③       | Conducto de extracción de la caldera            |
| ④       | Vaso de expansión 140 l                         |
| ⑤       | Subestación de intercambio de 192 kW            |
| ⑥       | Bomba recirculadora                             |
| ⑦       | Válvula micrométrica de regulación de la red    |
| ⑧       | Válvulas de control en retorno (Bypass caldera) |
| ⑨       | Válvulas de control en ida (Bypass caldera)     |
| ⑩       | Cuadro eléctrico existente                      |
| ⑪       | Cuadro eléctrico geotermia                      |
| —       | Conducciones existentes                         |
| —       | Conducciones proyectadas                        |
| —       | Conducción de ida de la red de calor            |
| —       | Conducción de retorno de la red de calor        |
| ←       | Sentido del flujo de agua caliente              |
| →       | Sentido del flujo de agua fría                  |



Estado actual



Estado reformado



Figura 1

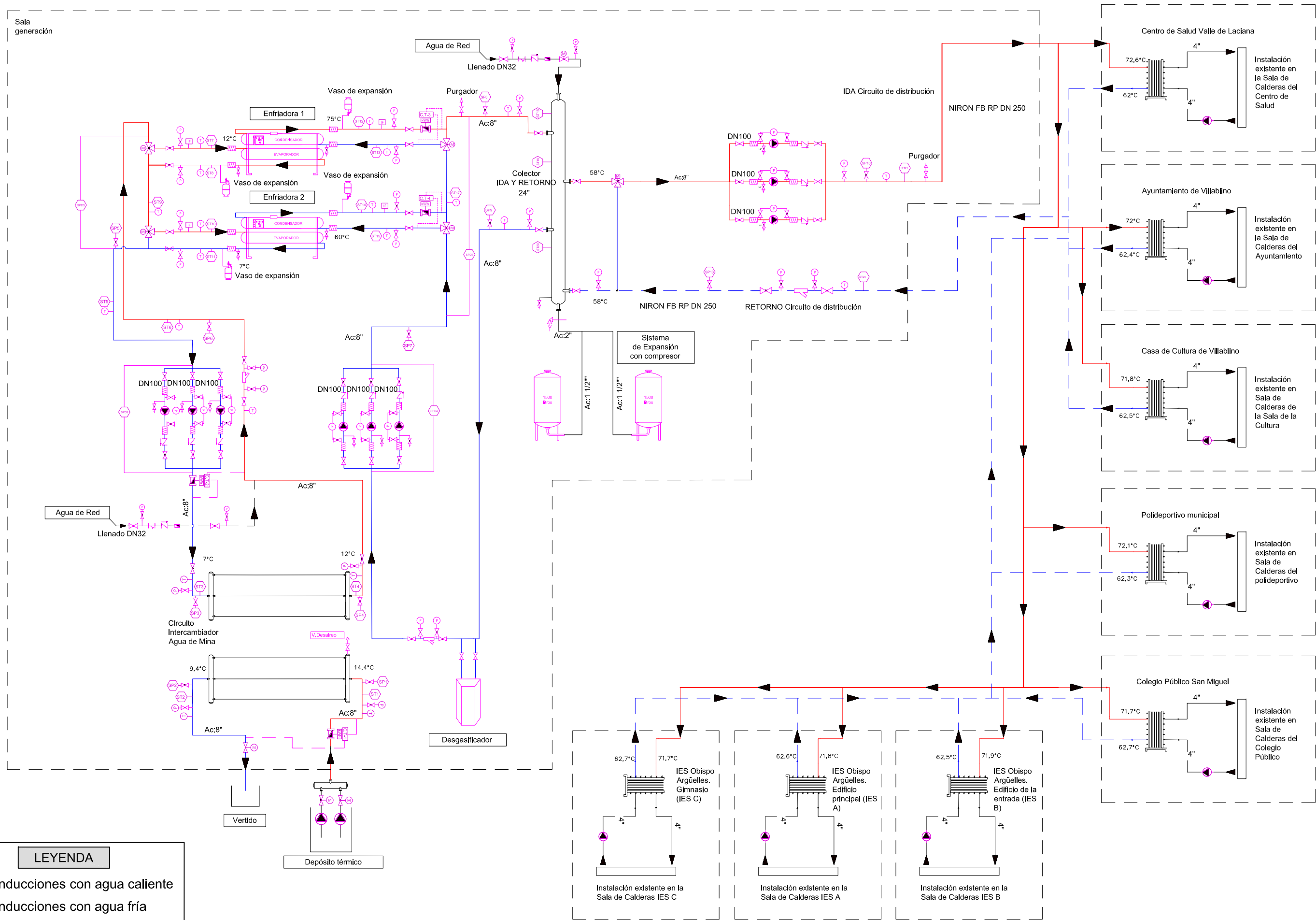


Figura 2

**LEYENDA**

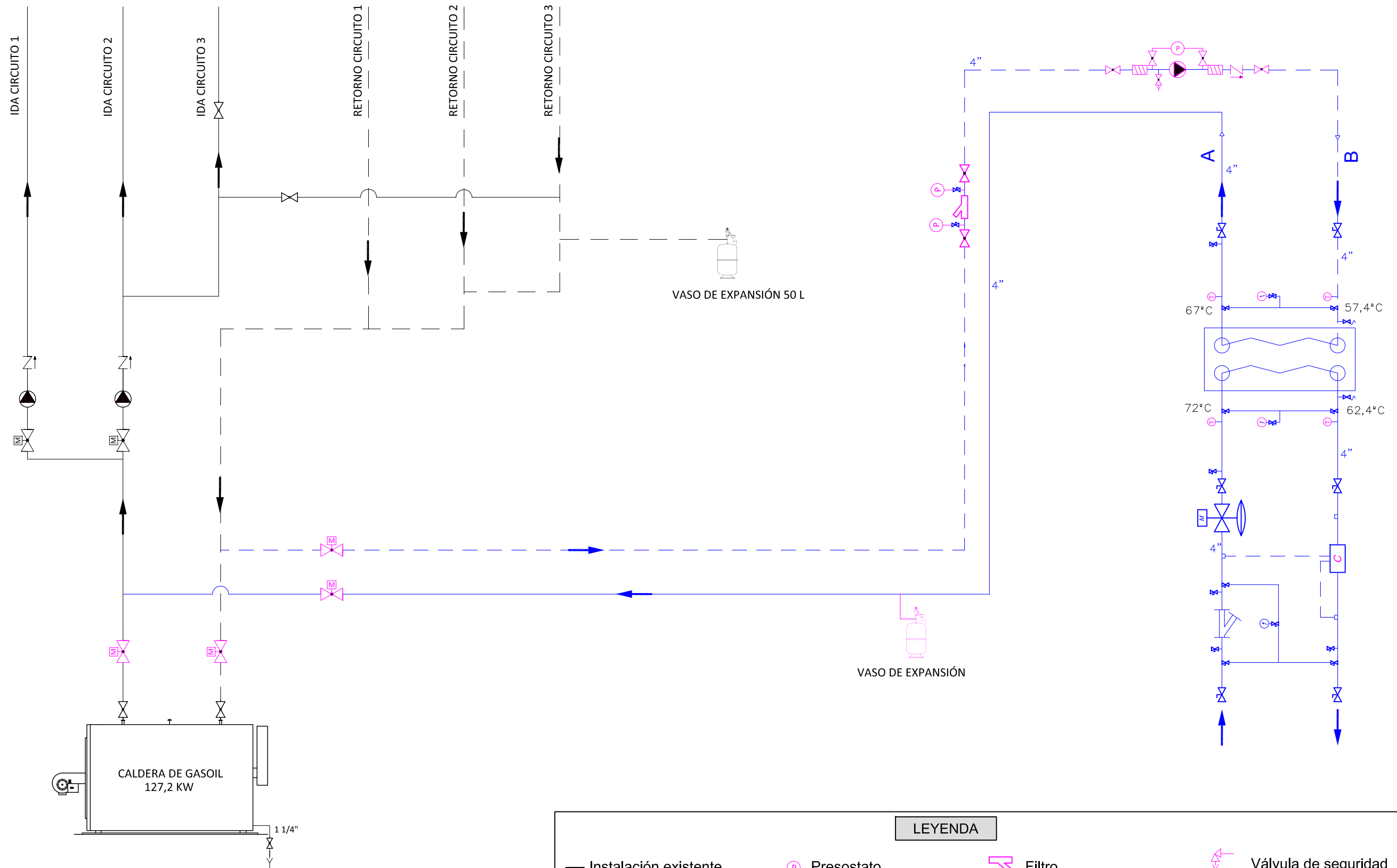
- ① Calderas de gasoil de 149,5 kW
- ② Bombas de impulsión
- ③ Conducto de extracción de la caldera
- ④ Vaso de expansión 35 l
- ⑤ Subestación de intercambio de 149,5 kW
- ⑥ Bomba recirculadora
- ⑦ Válvula micrométrica de regulación de la red
- ⑧ Válvulas de control en retorno (Bypass caldera)
- ⑨ Válvulas de control en ida (Bypass caldera)
- ⑩ Cuadro eléctrico existente
- ⑪ Cuadro eléctrico geotermia
- Conducciones existentes
- Conducciones proyectadas
- Conducción de ida de la red de calor
- Conducción de retorno de la red de calor
- ← Sentido del flujo de agua caliente
- Sentido del flujo de agua fría



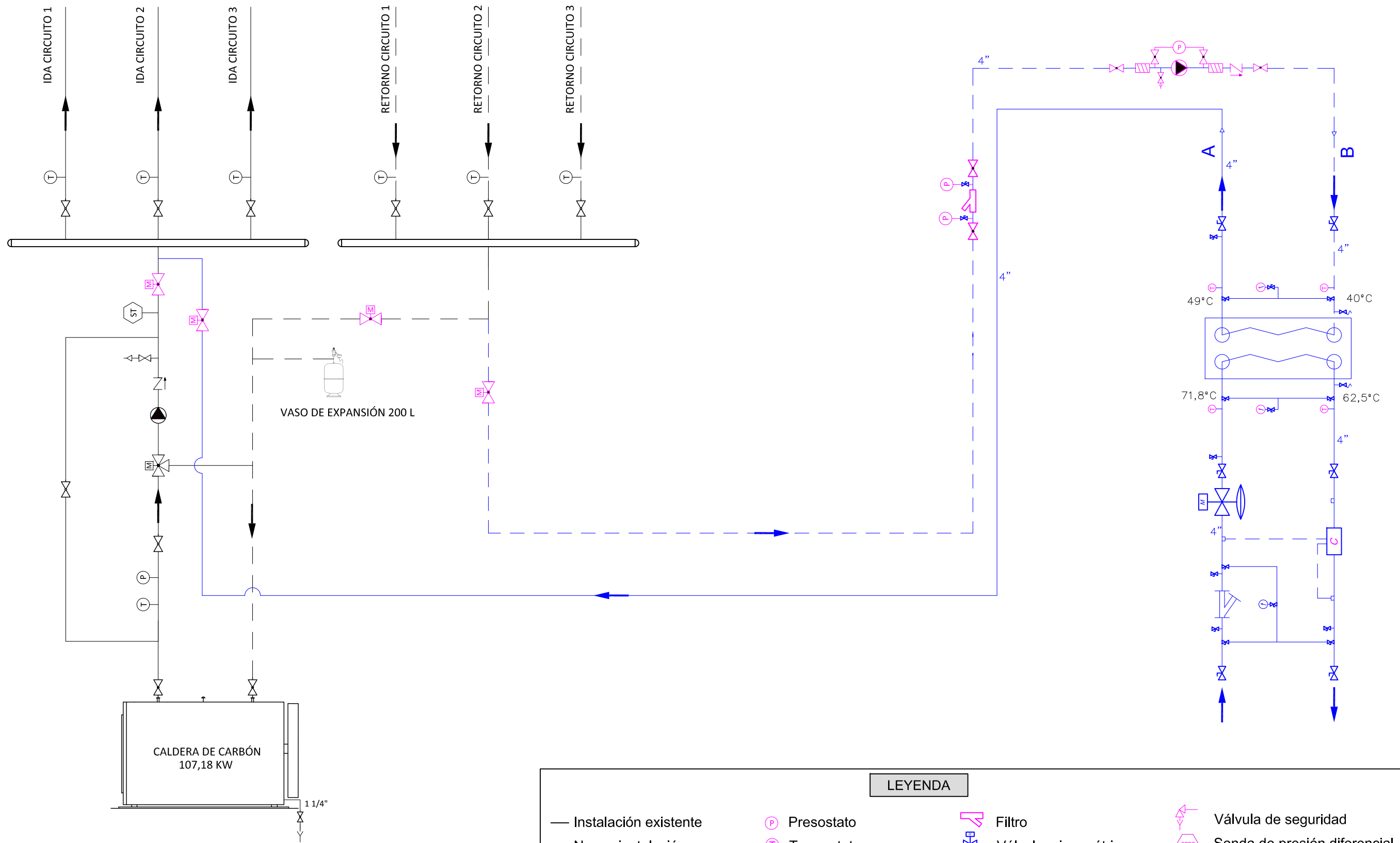


**LEYENDA**

- Conducciones con agua caliente
- Conducciones con agua fría
- ▶ Sentido del flujo

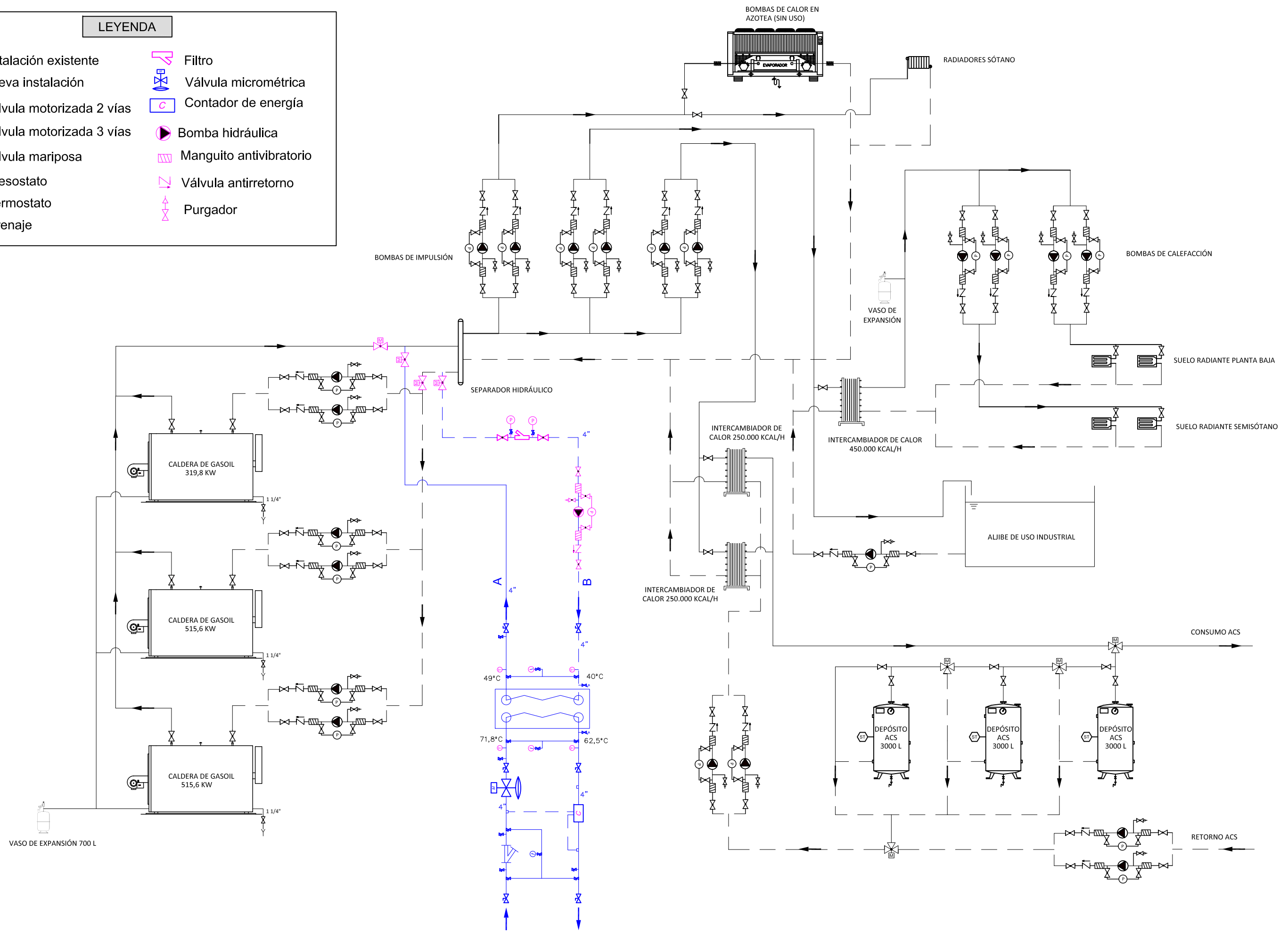
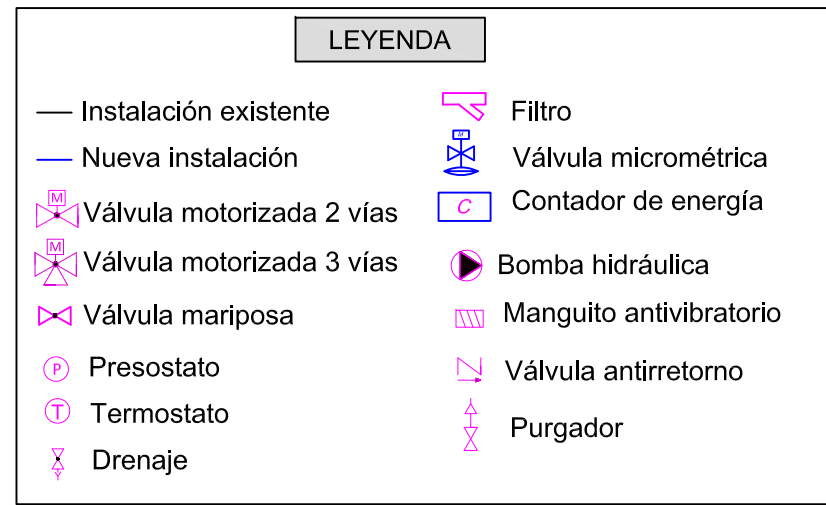


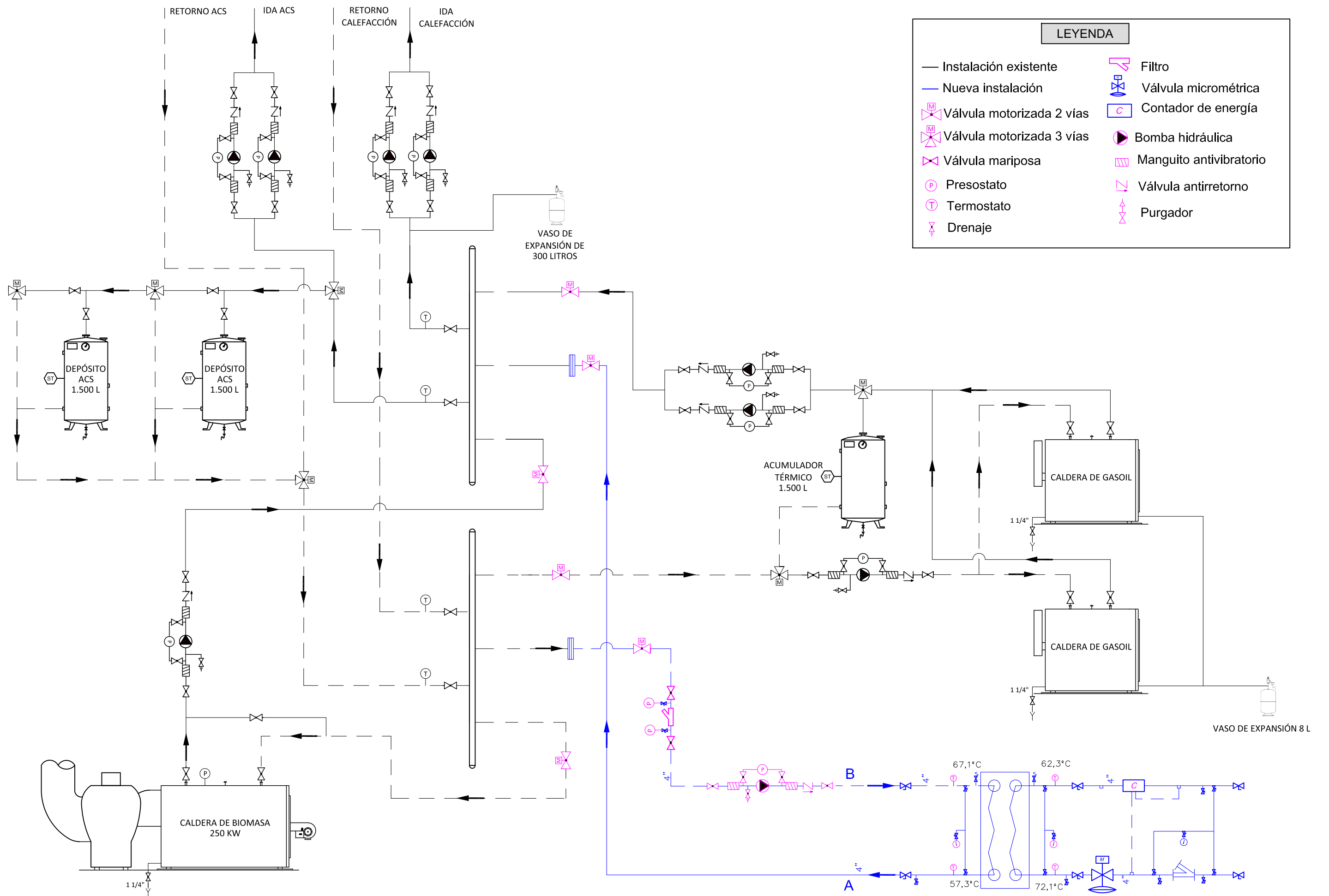
| LEYENDA |                              |     |                              |
|---------|------------------------------|-----|------------------------------|
| —       | Instalación existente        | Ⓟ   | Presostato                   |
| —       | Nueva instalación            | Ⓧ   | Termostato                   |
| Ⓜ       | Válvula motorizada 2 vías    | Ⓛ   | Filtro                       |
| Ⓜ       | Válvula motorizada 3 vías    | Ⓜ   | Válvula micrométrica         |
| Ⓜ       | Válvula mariposa             | Ⓢ   | Contador de energía          |
| Ⓜ       | Válvula antirretorno         | Ⓢ10 | Sonda de presión             |
| Ⓜ       | Bomba hidráulica             | Ⓢ21 | Sonda de temperatura         |
| Ⓜ       | Manguito antivibratorio      | Ⓢ   | Válvula de seguridad         |
| Ⓜ       | Válvula de seguridad         | Ⓢ   | Sonda de presión diferencial |
| Ⓜ       | Sonda de presión diferencial | Ⓢ   | Drenaje                      |
| Ⓜ       | Drenaje                      | Ⓢ   | Purgador                     |



| LEYENDA |                              |   |                              |
|---------|------------------------------|---|------------------------------|
| —       | Instalación existente        | Ⓟ | Presostato                   |
| —       | Nueva instalación            | Ⓣ | Termostato                   |
| Ⓜ       | Válvula motorizada 2 vías    | Ⓜ | Bomba hidráulica             |
| Ⓜ       | Válvula motorizada 3 vías    | Ⓜ | Manguito antivibratorio      |
| Ⓜ       | Válvula mariposa             | Ⓜ | Válvula antirretorno         |
| Ⓜ       | Filtro                       | Ⓜ | Contador de energía          |
| Ⓜ       | Válvula micrométrica         | Ⓜ | Sonda de presión             |
| Ⓜ       | Contador de energía          | Ⓜ | Sonda de temperatura         |
| Ⓜ       | Válvula de seguridad         | Ⓜ | Sonda de presión diferencial |
| Ⓜ       | Sonda de presión diferencial | Ⓜ | Drenaje                      |
| Ⓜ       | Drenaje                      | Ⓜ | Purgador                     |

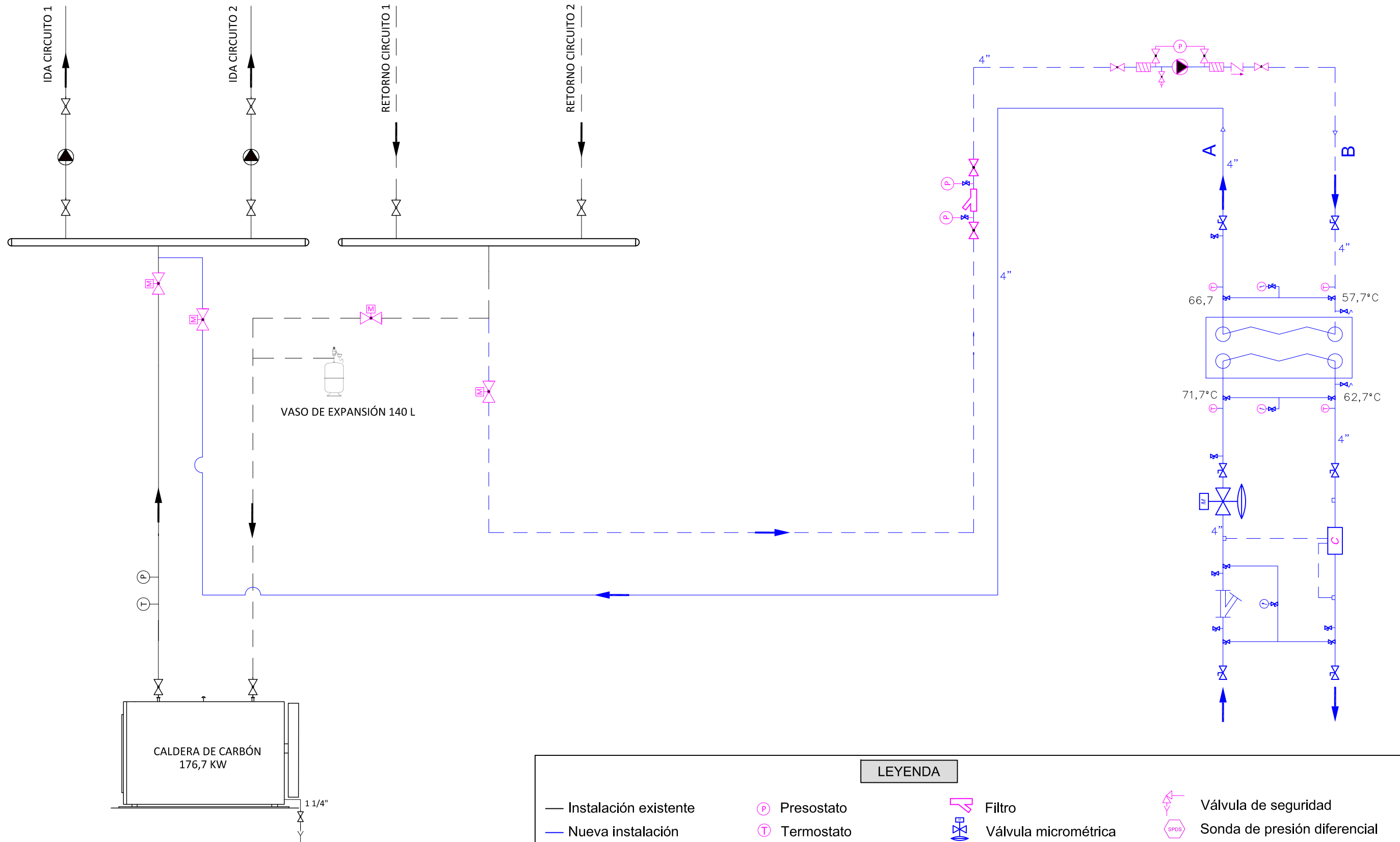






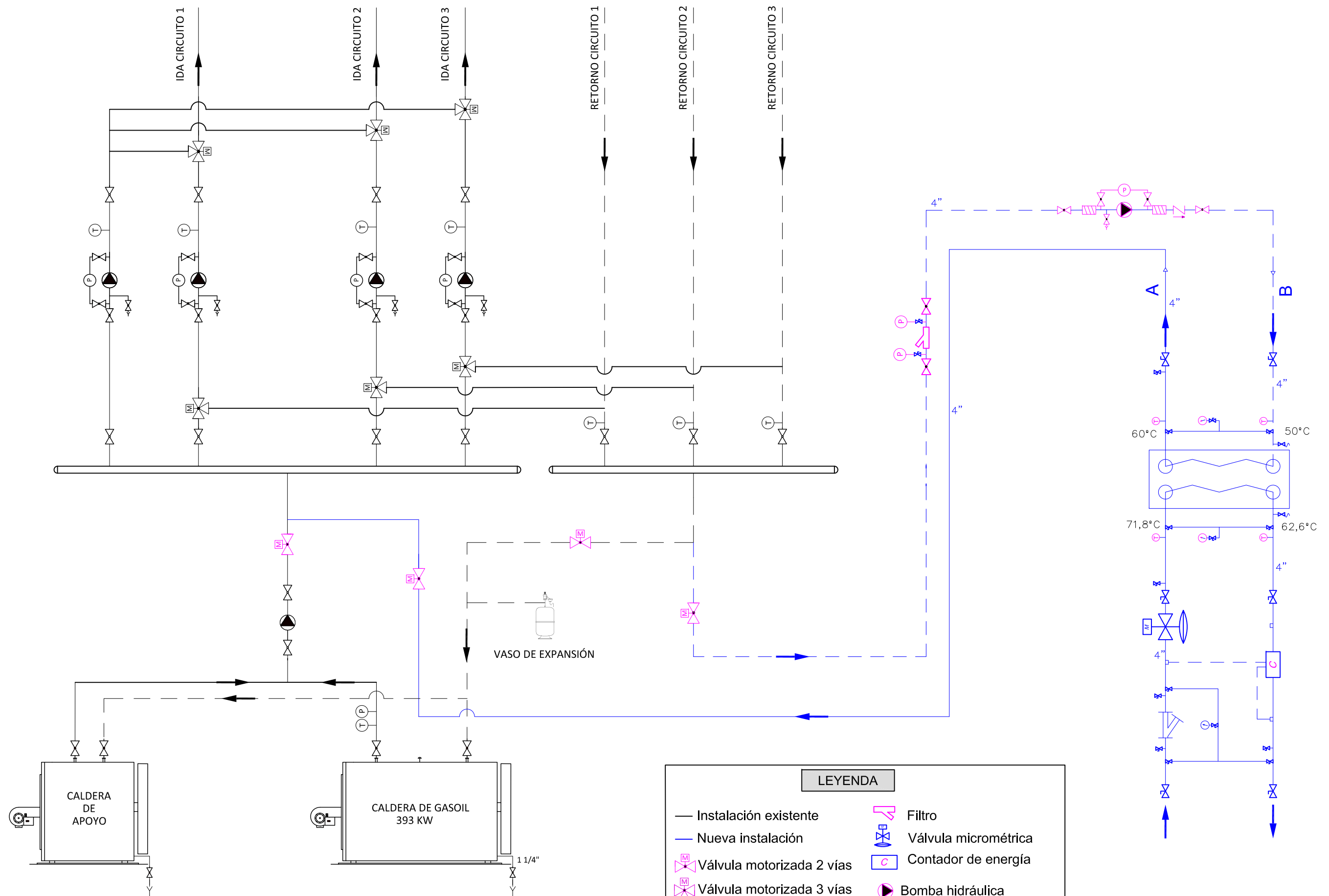
**LEYENDA**

- Instalación existente
- Nueva instalación
- ⊗ Válvula motorizada 2 vías
- ⊗ Válvula motorizada 3 vías
- ⊗ Válvula mariposa
- ⊗ Presostato
- ⊗ Termostato
- ⊗ Drenaje
- ⊗ Filtro
- ⊗ Válvula micrométrica
- ⊗ Contador de energía
- ⊗ Bomba hidráulica
- ⊗ Manguito antivibratorio
- ⊗ Válvula antirretorno
- ⊗ Purgador

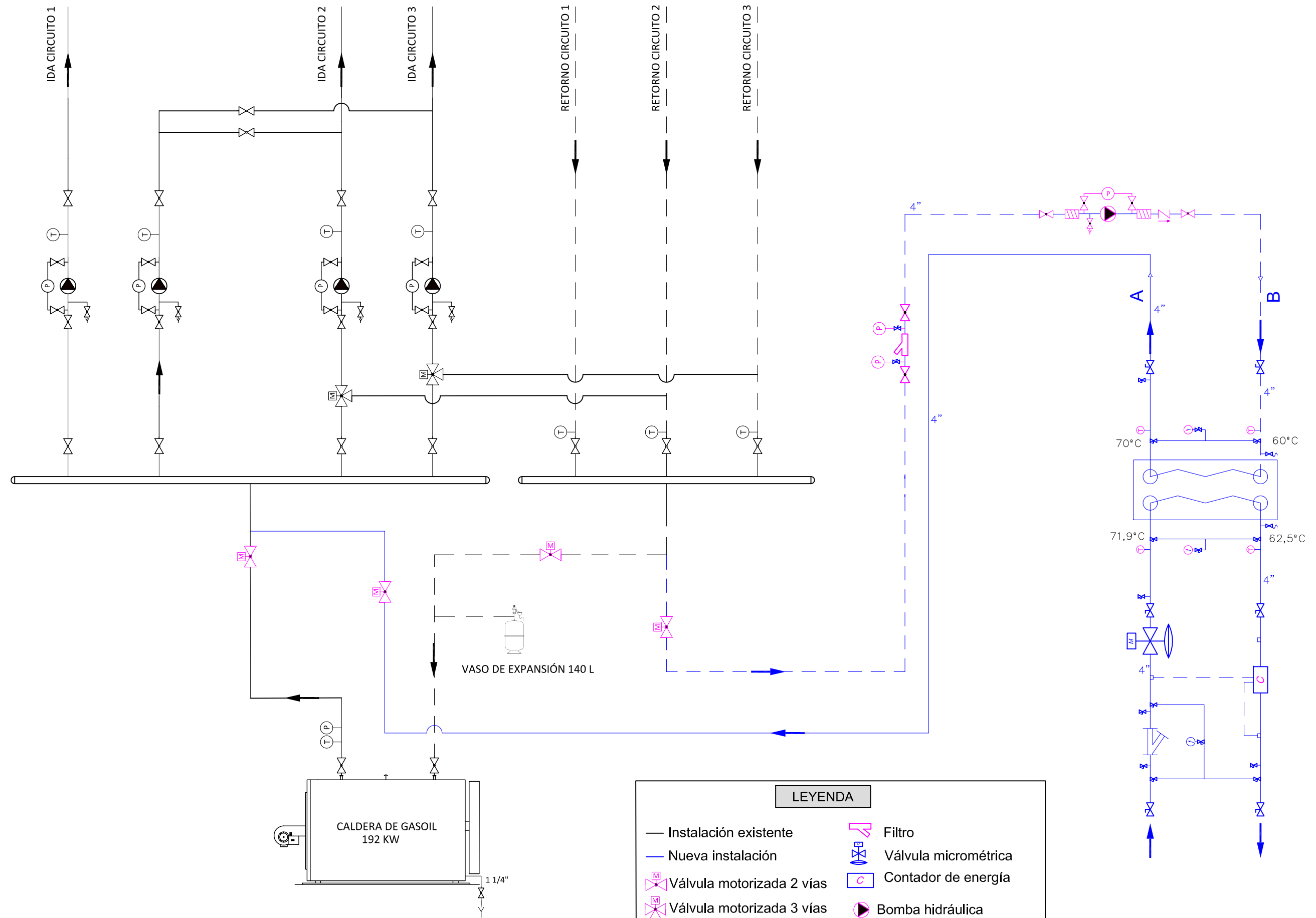


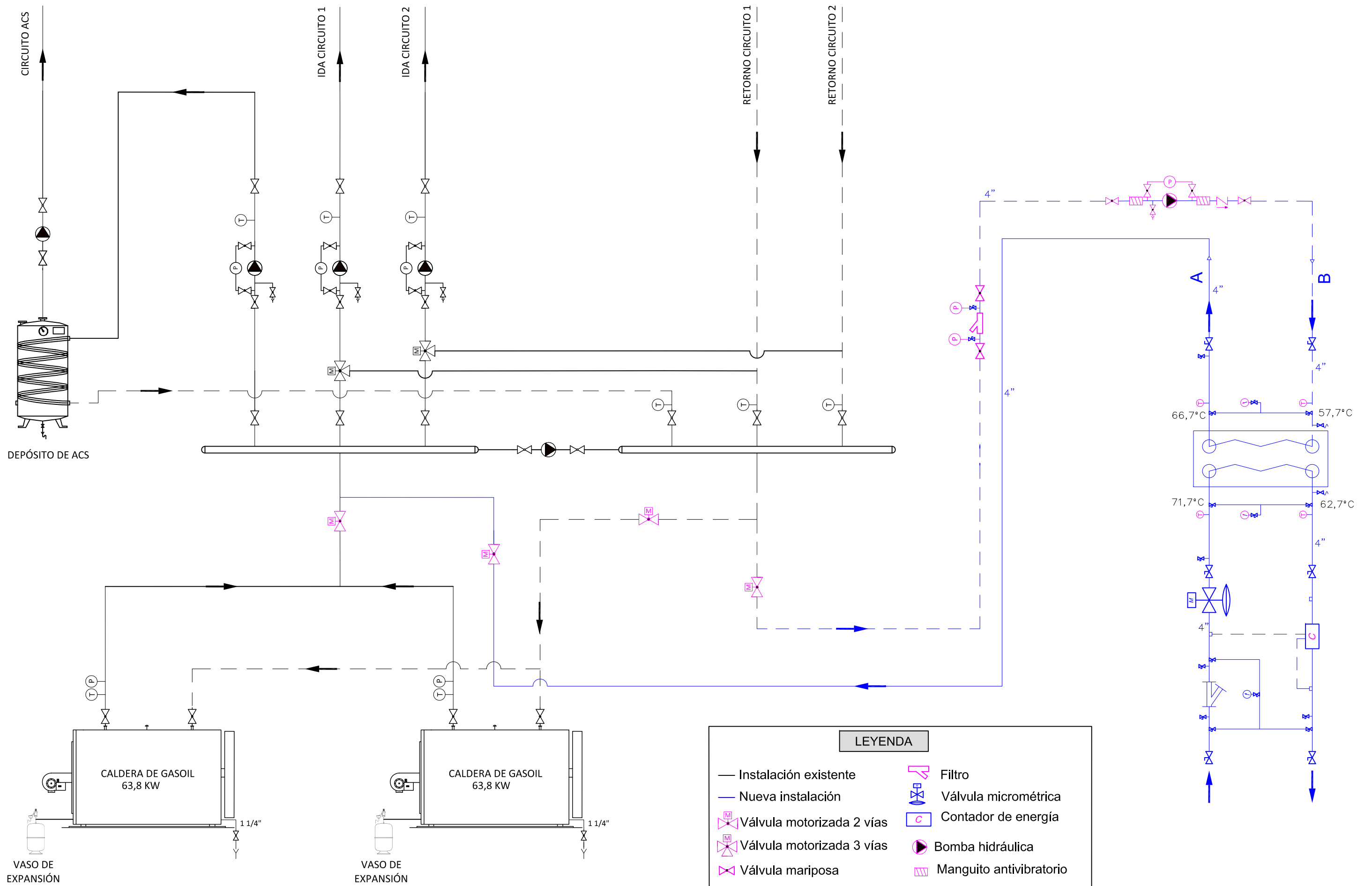
| LEYENDA |                           |   |                         |  |                      |  |                              |
|---------|---------------------------|---|-------------------------|--|----------------------|--|------------------------------|
| —       | Instalación existente     | Ⓟ | Presostato              |  | Filtro               |  | Válvula de seguridad         |
| —       | Nueva instalación         | Ⓣ | Termostato              |  | Válvula micrométrica |  | Sonda de presión diferencial |
|         | Válvula motorizada 2 vías |   | Bomba hidráulica        |  | Contador de energía  |  | Drenaje                      |
|         | Válvula motorizada 3 vías |   | Manguito antivibratorio |  | Sonda de presión     |  | Purgador                     |
|         | Válvula mariposa          |   | Válvula antirretorno    |  | Sonda de temperatura |  |                              |





| LEYENDA                   |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| — Instalación existente   | Filter                  |
| — Nueva instalación       | Válvula micrométrica    |
| Valvula motorizada 2 vias | Contador de energía     |
| Valvula motorizada 3 vias | Bomba hidráulica        |
| Válvula mariposa          | Manguito antivibratorio |





| LEYENDA |                           |
|---------|---------------------------|
| —       | Instalación existente     |
| —       | Nueva instalación         |
|         | Válvula motorizada 2 vías |
|         | Válvula motorizada 3 vías |
|         | Válvula mariposa          |
|         | Filtro                    |
|         | Válvula micrométrica      |
|         | Contador de energía       |
|         | Bomba hidráulica          |
|         | Manguito antivibratorio   |




## ANEXO 2. FICHAS DE PUNTOS DE MUESTREO Y ALTERNATIVAS



## A2. FICHAS DE PUNTOS DE MUESTREO



En el presente anexo se recogen las fichas resumen de los puntos de muestreo comentadas en el Capítulo IV. Estas fichas también sirven como tablas resumen de las alternativas expuestas en el capítulo VI.

### MINA DE MONTAÑA DE CALDERÓN

|  |   |
|--|---|
| <b>Etiqueta</b>  | <b>1</b>                                  |
| <b>Nombre</b>  | <b>Mina de montaña del Grupo Calderón</b> |
| Georreferenciación   | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29            |
| X  | 716.037,61                                |
| Y  | 4.759.124,45                              |
|  |   |
| Tipo   | Mina de montaña                           |
| Núcleo cercano   | Villablino                                |
| Datos núcleo cliente   | Villablino (3,31 km); Cota 1.000 m        |
| Altura   | 1.035 m                                   |
| Temperatura (°C)   | 14,4                                      |

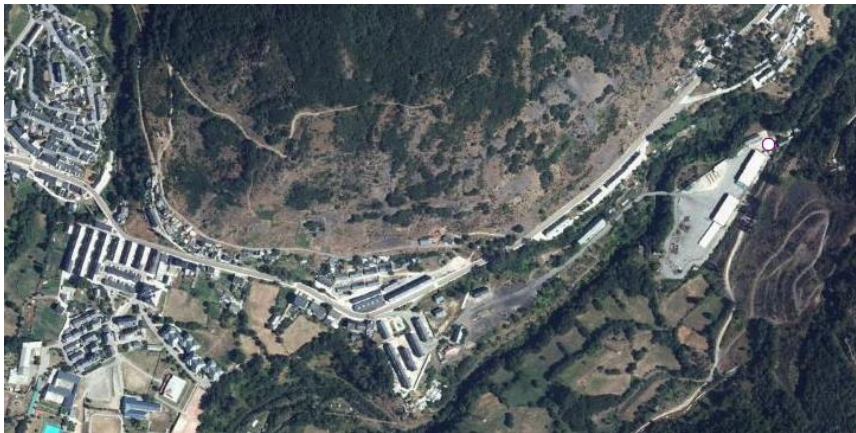



## MINA DE MONTAÑA DE LUMAJO

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| <b>Etiqueta</b>  | <b>2</b>                         |
| <b>Nombre</b>  | <b>Mina de montaña de Lumajo</b> |
| Georreferenciación   | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29   |
| X  | 724.144,30                       |
| Y  | 4.758.472,96                     |
|   |                                  |
|  |                                  |
| Tipo   | Mina de montaña                  |
| Núcleo cercano   | Villaseca                        |
| Datos núcleo cliente   | Villaseca (0,5 km); Cota 1.098   |
| Altura   | 1.145 m                          |
| Temperatura (°C)   | 12,9                             |
| Índice de Langelier  | -0,26                            |



## MINA DE MONTAÑA DE CARRASCONTE

|  |  |
|--|--|
| <b>Etiqueta</b>  | <b>3</b>                                     |
| <b>Nombre</b>  | <b>Mina de montaña del Grupo Carrasconte</b> |
| Georreferenciación   | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29               |
| X  | 725.400,38                                   |
| Y  | 4.758.388,09                                 |
|   |  |
|  |  |
| Tipo   | Mina de montaña                              |
| Núcleo cercano   | Villaseca                                    |
| Datos núcleo cliente   | Villaseca (1,15 km); Cota 1.098              |
| Altura   | 1.109 m                                      |
| Temperatura (°C)   | 12,5   |
| Índice de Langelier  | 0,10   |



## CALDERÓN TRANSFORMADORES

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| <b>Etiqueta</b>    | <b>4</b>                        |
| <b>Nombre</b>      | <b>Calderón transformadores</b> |
| Georreferenciación | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29  |
| X                  | 715.941,37                      |
| Y                  | 4.759.039,05                    |





|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| Tipo                 | Mina de montaña                  |
| Núcleo cercano       | Villablino                       |
| Datos núcleo cliente | Villablino (3,31 km); Cota 1.000 |
| Altura               | 1.021 m                          |
| Temperatura (°C)     | 14,7                             |
| Índice de Langelier  | 0,50                             |







## BOLSADA CABOALLES DE ABAJO

|   |   |
|---|---|
| <b>Etiqueta</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Nombre</b>   | <b>Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de Abajo)</b>                      |
| Georreferenciación  | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29  |
| X   | 715.331,08  |
| Y   | 4.758.484,29  |
| <br> |   |
| <b>Tipo</b>   | <b>Mina de montaña</b>  |
| <b>Núcleo cercano</b>   | <b>Caboalles de Abajo y Villablino</b>                                      |
| <b>Datos núcleo cliente</b>   | Caboalles de Abajo (1,25 km); Cota 1.041-- Villablino (3,54 km); Cota 1.000 |
| <b>Altura</b>   | 1.012 m   |
| <b>Temperatura (°C)</b>   | 12,2  |
| <b>Índice de Langelier</b>  | -0,14   |





## BOLSADA CABOALLES DE ARRIBA

|  |   |
|--|---|
| <b>Etiqueta</b>  | <b>6</b>  |
| <b>Nombre</b>  | <b>Mina de montaña de Bolsada (Caboalles de Arriba)</b> |
| Georreferenciación   | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29                          |
| X  | 711.589,23  |
| Y  | 4.759.043,73  |
|   |   |
|  |   |
| Tipo   | Mina de montaña   |
| Núcleo cercano   | Caboalles de Arriba                                     |
| Datos núcleo cliente   | Caboalles de Arriba (1 km); Cota 1.095                  |
| Altura   | 1.131 m   |
| Temperatura (°C)   | 10  |
| Índice de Langelier  | -0,84   |





## MINA DE MONTAÑA PAULINA

|   |   |
|---|---|
| <b>Etiqueta</b>   | <b>7</b>                                  |
| <b>Nombre</b>   | <b>Mina de montaña Paulina</b>            |
| Georreferenciación  | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29            |
| X   | 711.231,05                                |
| Y   | 4.759.273,04                              |
| <br> |   |
| Tipo  | Mina de montaña                           |
| Núcleo cercano  | Caboalles de Arriba                       |
| Datos núcleo cliente  | Caboalles de Arriba (1,47 km); Cota 1.095 |
| Altura  | 1.145 m                                   |
| Temperatura (°C)  | 9,8                                       |
| Índice de Langelier   | -0,98                                     |



## SENDA VERDE MARÍA

|  |   |
|--|---|
| <b>Etiqueta</b>  | <b>8</b>                                |
| <b>Nombre</b>  | <b>Pozo María</b>                       |
| Georreferenciación   | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29          |
| X  | 716.037,61                              |
| Y  | 4.759.124,45                            |
| <br> |   |
| Tipo   | Pozo minero                             |
| Núcleo cercano   | Caboalles de Abajo                      |
| Datos núcleo cliente   | Caboalles de Abajo (0,9 km); Cota 1.041 |
| Altura   | 1.005 m                                 |
| Temperatura (°C)   | 13,9                                    |
| Índice de Langelier  | -0,06                                   |



## TRANSVERSAL VILLABLINO

|                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| <b>Etiqueta</b>    | <b>9</b>                       |
| <b>Nombre</b>      | <b>Transversal Villablino</b>  |
| Georreferenciación | Coordenadas UTM ETRS89 HUSO 29 |
| X                  | 719.146,29                     |
| Y                  | 4.757.362,27                   |



|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| Tipo                 | Mina de montaña                  |
| Núcleo cercano       | Villablino                       |
| Datos núcleo cliente | Villablino (0,95 km); Cota 1.000 |
| Altura               | 982 m                            |
| Temperatura (°C)     | 14,6                             |
| Índice de Langelier  | -0,08                            |



## ANEXO 3. INFORMES DE CÁLCULO



### A3. INFORMES DE CÁLCULO

#### INTERCAMBIADOR DE AGUA DE MINA

Revisión 0

#### Rating del sistema

| <b>HTRI</b>                      |                                | <b>HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET</b> |                                    |                                    |                                | Page 1<br>SI Units  |                       |  |
|----------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------|--|
| Service of Unit                  |                                | Item No.                                |                                    |                                    |                                |                     |                       |  |
| Type                             | AEN                            | Orientation                             | Horizontal                         | Connected In                       | 3 Parallel                     | 2 Series            |                       |  |
| Surf/Unit (Gross/Eff)            | 264,87 / 263,49 m <sup>2</sup> | Shell/Unit                              | 6                                  | Surf/Shell (Gross/Eff)             | 44,144 / 43,914 m <sup>2</sup> |                     |                       |  |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT          |                                |   |                                    |                                    |                                |                     |                       |  |
| Fluid Allocation                 |                                | Shell Side                              |                                    |                                    | Tube Side                      |                     |                       |  |
| Fluid Name                       |                                | CIRCUITO GEOTERMIA (FRIO)               |                                    |                                    | CIRCUITO MINA (CALIENTE)       |                     |                       |  |
| Fluid Quantity, Total            | kg/s                           | 60,700                                  |                                    |                                    | 60,700                         |                     |                       |  |
| Vapor (In/Out)                   | wt%                            | 0,00                                    | 0,00                               | 0,00                               | 0,00                           |                     |                       |  |
| Liquid                           | wt%                            | 100,00                                  | 100,00                             | 100,00                             | 100,00                         |                     |                       |  |
| Temperature (In/Out)             | C                              | 7,00                                    | 12,00                              | 14,40                              | 9,40                           |                     |                       |  |
| Density                          | kg/m <sup>3</sup>              | 1001,1                                  | 999,81                             | 999,15                             | 1000,5                         |                     |                       |  |
| Viscosity                        | mN-s/m <sup>2</sup>            | 1,3814                                  | 1,2150                             | 1,1452                             | 1,2977                         |                     |                       |  |
| Specific Heat                    | kJ/kg-C                        | 4,2051                                  | 4,1994                             | 4,1968                             | 4,2023                         |                     |                       |  |
| Thermal Conductivity             | W/m-C                          | 0,6153                                  | 0,6185                             | 0,6200                             | 0,6169                         |                     |                       |  |
| Critical Pressure                | kPa                            |   |                                    |                                    |                                |                     |                       |  |
| Inlet Pressure                   | kPa                            | 300,00                                  |                                    |                                    | 300,00                         |                     |                       |  |
| Velocity                         | m/s                            |   | 0,81                               |                                    | 0,97                           |                     |                       |  |
| Pressure Drop, Allow/Calc        | kPa                            | 68,647                                  | 188,50                             | 68,647                             | 15,421                         |                     |                       |  |
| Average Film Coefficient         | W/m <sup>2</sup> -K            | 6972,4                                  |                                    |                                    | 4149,7                         |                     |                       |  |
| Fouling Resistance (min)         | m <sup>2</sup> -K/W            | 0,000170                                |                                    |                                    | 0,000170                       |                     |                       |  |
| Heat Exchanged                   | 1,2757 MegaWatts               | MTD (Corrected)                         | 2,4 C                              | Overdesign                         | -51,16 %                       |                     |                       |  |
| Transfer Rate, Service           | 2042,8 W/m <sup>2</sup> -K     | Calculated                              | 997,77 W/m <sup>2</sup> -K         | Clean                              | 1628,9 W/m <sup>2</sup> -K     |                     |                       |  |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL        |                                |   |                                    | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) |                                |                     |                       |  |
| Design Pressure                  |                                | Shell Side                              | 600,00                             | Tube Side                          | 600,00                         |                     |                       |  |
| Design Temperature               |                                | C                                       | 50,00                              | C                                  | 50,00                          |                     |                       |  |
| No Passes per Shell              |                                | 1                                       |                                    | 1                                  |                                |                     |                       |  |
| Flow Direction                   |                                | Downward                                |                                    |                                    |                                |                     |                       |  |
| Connections                      | In mm                          | 1 @ 206,50                              |                                    | 1 @ 206,50                         |                                |                     |                       |  |
| Size & Rating                    | Out mm                         | 1 @ 206,50                              |                                    | 1 @ 206,50                         |                                |                     |                       |  |
|                                  | Liq. Out mm                    | @                                       |                                    | @                                  |                                |                     |                       |  |
| Tube No.                         | 121,00                         | OD                                      | 19,050 mm                          | Thk(Avg)                           | 2,108 mm                       | Length              | 6,096 m               |  |
| Tube Type                        | Plain                          | Material                                | 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni) |                                    | Pairs seal strips              | 0                   |                       |  |
| Shell ID                         | 336,00 mm                      | Kettle ID                               | mm                                 |                                    |                                |                     | Passlane Seal Rod No. |  |
| Cross Baffle Type                | Perpend. Single-Seg.           | %Cut (Diam)                             | 25                                 |                                    | Impingement Plate              | None                |                       |  |
| Spacing(c/c)                     | 151,20 mm                      | Inlet                                   | 537,32 mm                          |                                    | No. of Crosspasses             | 35                  |                       |  |
| Rho-V <sup>2</sup> -Inlet Nozzle | kg/m-s <sup>2</sup>            | Shell Entrance                          | kg/m-s <sup>2</sup>                |                                    | Shell Exit                     | kg/m-s <sup>2</sup> |                       |  |
|                                  |                                | Bundle Entrance                         | kg/m-s <sup>2</sup>                |                                    | Bundle Exit                    | kg/m-s <sup>2</sup> |                       |  |
| Weight/Shell                     | kg                             | Filled with Water                       | kg                                 |                                    | Bundle                         | kg                  |                       |  |
| Notes:                           |                                | Thermal Resistance, %                   | Velocities; m/s                    |                                    | Flow Fractions                 |                     |                       |  |
|                                  |                                | Shell                                   | 14,31                              | Shellside                          | 0,81                           | A                   | 0,170                 |  |
|                                  |                                | Tube                                    | 30,88                              | Tubeside                           | 0,97                           | B                   | 0,581                 |  |
|                                  |                                | Fouling                                 | 38,74                              | Crossflow                          | 1,17                           | C                   | 0,056                 |  |
|                                  |                                | Metal                                   | 16,07                              | Window                             | 1,75                           | E                   | 0,192                 |  |
|                                  |                                |   |                                    |                                    |                                | F                   | 0,000                 |  |



Revisión 1

Rating del sistema

| HTRI                             |                                | HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET |                                    |                                    |                                | Page 1          |                            |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------|
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | SI Units        |                            |
| Service of Unit                  |                                | Item No.                         |                                    |                                    |                                |                 |                            |
| Type                             | AEN                            | Orientation                      | Horizontal                         | Connected In                       | 3 Parallel                     | 2 Series        |                            |
| Surf/Unit (Gross/Eff)            | 304,27 / 302,68 m <sup>2</sup> | Shell/Unit                       | 6                                  | Surf/Shell (Gross/Eff)             | 50,711 / 50,447 m <sup>2</sup> |                 |                            |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT          |                                |                                  |                                    |                                    |                                |                 |                            |
| Fluid Allocation                 |                                | Shell Side                       |                                    |                                    | Tube Side                      |                 |                            |
| Fluid Name                       |                                | CIRCUITO GEOTERMIA (FRIO)        |                                    |                                    | CIRCUITO MINA (CALIENTE)       |                 |                            |
| Fluid Quantity, Total            |                                | 60,700                           |                                    |                                    | 60,700                         |                 |                            |
| Vapor (In/Out)                   |                                | 0,00                             |                                    |                                    | 0,00                           |                 |                            |
| Liquid                           |                                | 100,00                           |                                    |                                    | 100,00                         |                 |                            |
| Temperature (In/Out)             |                                | 7,00                             |                                    |                                    | 14,40                          |                 |                            |
| Density                          |                                | 1001,1                           |                                    |                                    | 999,15                         |                 |                            |
| Viscosity                        |                                | 1,3814                           |                                    |                                    | 1,2150                         |                 |                            |
| Specific Heat                    |                                | 4,2051                           |                                    |                                    | 4,1968                         |                 |                            |
| Thermal Conductivity             |                                | 0,6153                           |                                    |                                    | 0,6185                         |                 |                            |
| Critical Pressure                |                                |                                  |                                    |                                    |                                |                 |                            |
| Inlet Pressure                   |                                | 300,00                           |                                    |                                    | 300,00                         |                 |                            |
| Velocity                         |                                |                                  |                                    |                                    | 0,96                           |                 |                            |
| Pressure Drop, Allow/Calc        |                                | 68,647                           |                                    |                                    | 230,14                         |                 |                            |
| Average Film Coefficient         |                                | 7051,1                           |                                    |                                    | 3709,5                         |                 |                            |
| Fouling Resistance (min)         |                                | 0,000170                         |                                    |                                    | 0,000170                       |                 |                            |
| Heat Exchanged                   |                                | 1,2757 MegaWatts                 |                                    | MTD (Corrected)                    | 2,4 C                          | Overdesign      | -45,88 %                   |
| Transfer Rate, Service           |                                | 1781,2 W/m <sup>2</sup> -K       |                                    | Calculated                         | 963,99 W/m <sup>2</sup> -K     | Clean           | 1540,8 W/m <sup>2</sup> -K |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL        |                                |                                  |                                    | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) |                                |                 |                            |
| Design Pressure                  |                                | kPaG                             |                                    | Shell Side                         |                                | Tube Side       |                            |
| Design Temperature               |                                | C                                |                                    | 50,00                              |                                | 50,00           |                            |
| No Passes per Shell              |                                | 1                                |                                    | 1                                  |                                |                 |                            |
| Flow Direction                   |                                | Downward                         |                                    |                                    |                                |                 |                            |
| Connections                      |                                | In                               | mm                                 | 1 @ 206,50                         | 1 @ 206,50                     |                 |                            |
| Size & Rating                    |                                | Out                              | mm                                 | 1 @ 206,50                         | 1 @ 206,50                     |                 |                            |
|                                  |                                | Liq. Out                         | mm                                 | @                                  | 1 @                            |                 |                            |
| Tube No.                         | 139,00                         | OD                               | 19,050 mm                          | Thk(Avg)                           | 2,108 mm                       | Length          | 6,096 m                    |
| Tube Type                        | Plain                          | Material                         | 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni) | Pairs seal strips                  | 0                              | Pitch           | 25,000 mm                  |
| Shell ID                         | 336,00 mm                      | Kettle ID                        | mm                                 | Passlane Seal Rod No.              |                                | Tube pattern    | 30                         |
| Cross Baffle Type                | Perpend. Single-Seg.           | %Cut (Diam)                      | 25                                 | Impingement Plate                  | None                           |                 |                            |
| Spacing(c/c)                     | 151,20 mm                      | Inlet                            | 537,32 mm                          | No. of Crosspasses                 | 35                             |                 |                            |
| Rho-V <sup>2</sup> -Inlet Nozzle | kg/m-s <sup>2</sup>            | Shell Entrance                   | kg/m-s <sup>2</sup>                | Shell Exit                         | kg/m-s <sup>2</sup>            |                 |                            |
|                                  |                                | Bundle Entrance                  | kg/m-s <sup>2</sup>                | Bundle Exit                        | kg/m-s <sup>2</sup>            |                 |                            |
| Weight/Shell                     | kg                             | Filled with Water                | kg                                 | Bundle                             | kg                             |                 |                            |
| Notes:                           |                                |                                  |                                    | Thermal Resistance, %              |                                | Velocities; m/s |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    | Shell 13,67                        |                                | Shellside 0,96  |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    | Tube 33,37                         |                                | Tubeside 0,84   |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    | Fouling 37,43                      |                                | Crossflow 1,59  |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    | Metal 15,52                        |                                | Window 1,89     |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | Flow Fractions  |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | A 0,226         |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | B 0,488         |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | C 0,066         |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | E 0,220         |                            |
|                                  |                                |                                  |                                    |                                    |                                | F 0,000         |                            |





Revisión 2

Rating del sistema

| HTRI                      |                     | HEAT EXCHANGER RATING DATA SHEET |                   |                                    |                          | Page 1<br>SI Units         |                                |      |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|------|
| Service of Unit           |                     |                                  | Item No.          |                                    |                          |                            |                                |      |
| Type                      | AEN                 |                                  | Orientation       | Horizontal                         |                          | Connected In               | 2 Parallel 3 Series            |      |
| Surf/Unit (Gross/Eff)     | 763,95 / 758,78     | m <sup>2</sup>                   | Shell/Unit        | 6                                  |                          | Surf/Shell (Gross/Eff)     | 127,33 / 126,46 m <sup>2</sup> |      |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT   |                     |                                  |                   |                                    |                          |                            |                                |      |
| Fluid Allocation          |                     | Shell Side                       |                   |                                    | Tube Side                |                            |                                |      |
| Fluid Name                |                     | CIRCUITO GEOTERMIA (FRIO)        |                   |                                    | CIRCUITO MINA (CALIENTE) |                            |                                |      |
| Fluid Quantity, Total     |                     | 60,700                           |                   |                                    | 60,700                   |                            |                                |      |
| Vapor (In/Out)            |                     | 0,00                             |                   |                                    | 0,00                     |                            |                                |      |
| Liquid                    |                     | 100,00                           |                   |                                    | 100,00                   |                            |                                |      |
| Temperature (In/Out)      |                     | 7,00                             |                   |                                    | 14,40                    |                            |                                |      |
| Density                   |                     | 1001,1                           |                   |                                    | 999,15                   |                            |                                |      |
| Viscosity                 |                     | 1,3814                           |                   |                                    | 1,2150                   |                            |                                |      |
| Specific Heat             |                     | 4,2051                           |                   |                                    | 4,1968                   |                            |                                |      |
| Thermal Conductivity      |                     | 0,6153                           |                   |                                    | 0,6185                   |                            |                                |      |
| Critical Pressure         |                     |                                  |                   |                                    |                          |                            |                                |      |
| Inlet Pressure            |                     | 300,00                           |                   |                                    | 300,00                   |                            |                                |      |
| Velocity                  |                     | m/s                              |                   |                                    | 0,61                     |                            |                                |      |
| Pressure Drop, Allow/Calc |                     | 68,647                           |                   |                                    | 93,793                   |                            |                                |      |
| Average Film Coefficient  |                     | W/m <sup>2</sup> -K              |                   |                                    | 5057,5                   |                            |                                |      |
| Fouling Resistance (min)  |                     | m <sup>2</sup> -K/W              |                   |                                    | 0,000170                 |                            |                                |      |
| Heat Exchanged            |                     | 1,2757 MegaWatts                 |                   | MTD (Corrected)                    |                          | 2,4 C                      |                                |      |
| Transfer Rate, Service    |                     | 707,21 W/m <sup>2</sup> -K       |                   | Calculated                         |                          | 713,80 W/m <sup>2</sup> -K |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   | Clean                              |                          | 987,67 W/m <sup>2</sup> -K |                                |      |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL |                     |                                  |                   | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) |                          |                            |                                |      |
| Design Pressure           |                     | kPaG                             |                   | 600,00                             |                          | 600,00                     |                                |      |
| Design Temperature        |                     | C                                |                   | 50,00                              |                          | 50,00                      |                                |      |
| No Passes per Shell       |                     |                                  |                   | 1                                  |                          | 1                          |                                |      |
| Flow Direction            |                     |                                  |                   | Downward                           |                          |                            |                                |      |
| Connections               |                     | In mm                            |                   | 1 @ 206,50                         |                          | 1 @ 206,50                 |                                |      |
| Size & Rating             |                     | Out mm                           |                   | 1 @ 206,50                         |                          | 1 @ 206,50                 |                                |      |
|                           |                     | Liq. Out mm                      |                   | @                                  |                          | 1 @                        |                                |      |
| Tube No.                  | 349,00              | OD                               | 19,050 mm         | Thk(Avg)                           | 2,108 mm                 | Length                     | 6,096 m                        |      |
| Tube Type                 | Plain               |                                  | Material          | 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni) |                          | Pairs seal strips          | 2                              |      |
| Shell ID                  | 520,00 mm           | Kettle ID                        |                   |                                    | Passlane Seal Rod No.    |                            |                                |      |
| Cross Baffle Type         | Parallel            | Double-Seg.                      |                   |                                    | %Cut (Diam)              | 25                         | Impingement Plate              | None |
| Spacing(c/c)              | 156,00 mm           | Inlet                            | 531,36 mm         |                                    | No. of Crosspasses       | 34                         |                                |      |
| Rho-V2-Inlet Nozzle       | kg/m-s <sup>2</sup> |                                  | Shell Entrance    | kg/m-s <sup>2</sup>                |                          | Shell Exit                 | kg/m-s <sup>2</sup>            |      |
|                           |                     |                                  | Bundle Entrance   | kg/m-s <sup>2</sup>                |                          | Bundle Exit                | kg/m-s <sup>2</sup>            |      |
| Weight/Shell              | kg                  |                                  | Filled with Water | kg                                 |                          | Bundle                     | kg                             |      |
| Notes:                    |                     |                                  |                   | Thermal Resistance, %              |                          | Velocities; m/s            |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   | Shell                              |                          | A                          |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   | Tube                               |                          | B                          |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   | Fouling                            |                          | C                          |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   | Metal                              |                          | E                          |                                |      |
|                           |                     |                                  |                   |                                    |                          | F                          |                                |      |



Revisión 2

Informe TEMA sistema

| HTRI   |  | HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET |                      |                                    |                                   | Page 1<br>SI Units                  |                 |
|--|--|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| Customer                                     |  | DOCTORADO ALEJANDRO MATAS          |                      | Job No.                            |                                   | RED DE CALOR DE VILLABLINO          |                 |
| Address                                      |  | GRUPO CALDERON                     |                      | Reference No.                      |                                   |                                     |                 |
| Plant Location                               |  | VALLE LACIANA                      |                      | Proposal No.                       |                                   |                                     |                 |
| Service of Unit                              |  |                                    |                      | Date                               |                                   | MARZO 2020 Rev 00                   |                 |
| Size   |  | 520 x 6096 mm                      | Type                 | AEN Horizontal                     | Item No.                          |                                     |                 |
| Surf/Unit (Gross/Eff)                        |  | 763,95 / 758,78 m <sup>2</sup>     | Shell/Unit           | 6                                  | Connected In                      | 2 Parallel 3 Series                 |                 |
|  |  |                                    |                      |                                    | Surf/Shell (Gross/Eff)            | 127,33 / 126,46 m <sup>2</sup>      |                 |
| PERFORMANCE OF ONE UNIT                      |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Fluid Allocation                             |  | Shell Side                         |                      | Tube Side                          |                                   |                                     |                 |
| Fluid Name                                   |  | CIRCUITO GEOTERMIA (FRIO)          |                      | CIRCUITO MINA (CALIENTE)           |                                   |                                     |                 |
| Fluid Quantity, Total kg/hr                  |  | 218520                             |                      | 218520                             |                                   |                                     |                 |
| Vapor (In/Out)                               |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Liquid                                       |  | 218520                             | 218520               | 218520                             | 218520                            |                                     |                 |
| Steam  |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Water  |  | 218520                             | 218520               | 218520                             | 218520                            |                                     |                 |
| Noncondensables                              |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Temperature (In/Out) C                       |  | 7,00                               | 12,00                | 14,40                              | 9,40                              |                                     |                 |
| Specific Gravity                             |  | 1,0015                             | 1,0003               | 0,9996                             | 1,0009                            |                                     |                 |
| Viscosity mN-s/m <sup>2</sup>                |  | 1,3814                             | 1,2150               | 1,1452                             | 1,2977                            |                                     |                 |
| Molecular Weight, Vapor                      |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Molecular Weight, Noncondensables            |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Specific Heat kJ/kg-C                        |  | 4,2051                             | 4,1994               | 4,1968                             | 4,2023                            |                                     |                 |
| Thermal Conductivity W/m-C                   |  | 0,6153                             | 0,6185               | 0,6200                             | 0,6169                            |                                     |                 |
| Latent Heat kJ/kg                            |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Inlet Pressure kPa                           |  | 300,00                             |                      | 300,00                             |                                   |                                     |                 |
| Velocity m/s                                 |  | 0,61                               |                      | 0,50                               |                                   |                                     |                 |
| Pressure Drop, Allow/Calc kPa                |  | 68,647                             | 93,793               | 68,647                             | 9,241                             |                                     |                 |
| Fouling Resistance (min) m <sup>2</sup> -K/W |  | 0,000170                           |                      | 0,000170                           |                                   |                                     |                 |
| Heat Exchanged                               |  | 1275737 W                          |                      | MTD (Corrected)                    |                                   | 2,4 C                               |                 |
| Transfer Rate, Service                       |  | 707,21 W/m <sup>2</sup> -K         |                      | Clean                              | 987,67 W/m <sup>2</sup> -K        | Actual 713,80 W/m <sup>2</sup> -K   |                 |
| CONSTRUCTION OF ONE SHELL                    |  |                                    |                      | Sketch (Bundle/Nozzle Orientation) |                                   |                                     |                 |
|  |  | Shell Side                         |                      | Tube Side                          |                                   |                                     |                 |
| Design/Test Pressure kPaG                    |  | 600,00 /                           |                      | 600,00 /                           |                                   |                                     |                 |
| Design Temperature C                         |  | 50,00                              |                      | 50,00                              |                                   |                                     |                 |
| No Passes per Shell                          |  | 1                                  |                      | 1                                  |                                   |                                     |                 |
| Corrosion Allowance mm                       |  | 0,000                              |                      | 0,000                              |                                   |                                     |                 |
| Connections                                  |  | In mm                              | 1 @ 206,50           | 1 @ 206,50                         |                                   |                                     |                 |
| Size & Rating                                |  | Out mm                             | 1 @ 206,50           | 1 @ 206,50                         |                                   |                                     |                 |
|  |  | Intermediate                       | @                    | @                                  |                                   |                                     |                 |
| Tube No.                                     | 349  | OD                                 | 19,050 mm            | Thk(Avg)                           | 2,108 mm                          | Length 6,096 m Pitch 25,000 mm      |                 |
| Tube Type                                    | Plain  | Material                           |                      |                                    |                                   | 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)  | Tube pattern 30 |
| Shell  | 304 Stainless steel (18 Cr, 8 Ni)            |                                    |                      | ID                                 | 520,00                            | OD 530,00 mm                        | Shell Cover     |
| Channel or Bonnet                            | 304 Stainless steel (18 Cr, 8 Ni)            |                                    |                      | Channel Cover                      | 304 Stainless steel (18 Cr, 8 Ni) |                                     |                 |
| Tubesheet-Stationary                         | 304 Stainless steel (18 Cr, 8 Ni)            |                                    |                      | Tubesheet-Floating                 |                                   |                                     |                 |
| Floating Head Cover                          |  |                                    |                      | Impingement Plate                  | None                              |                                     |                 |
| Baffles-Cross                                | 304 Stainless steel (18 Cr, Type Double-Seg. |                                    |                      | %Cut (Diam)                        | 25                                | Spacing(c/c) 156,00 Inlet 531,36 mm |                 |
| Baffles-Long                                 |  |                                    |                      | Seal Type                          |                                   |                                     |                 |
| Supports-Tube                                |  |                                    |                      | U-Bend                             | Type None                         |                                     |                 |
| Bypass Seal Arrangement                      | 2 pairs seal strips                          |                                    | Tube-Tubesheet Joint |                                    |                                   |                                     |                 |
| Expansion Joint                              |  |                                    |                      | Type                               |                                   |                                     |                 |
| Rho-V2-Inlet Nozzle                          | kg/m-s <sup>2</sup>                          |                                    | Bundle Entrance      |                                    | Bundle Exit kg/m-s <sup>2</sup>   |                                     |                 |
| Gaskets-Shell Side                           |  |                                    |                      | Tube Side                          |                                   |                                     |                 |
| - Floating Head                              |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Code Requirements                            | EN13445                                      |                                    |                      | TEMA Class                         |                                   | C                                   |                 |
| Weight/Shell                                 | kg   |                                    | Filled with Water    |                                    | kg                                |                                     |                 |
| Remarks:                                     |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
|  |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |
| Reprinted with Permission (v7,3.2)           |  |                                    |                      |                                    |                                   |                                     |                 |



## SUBESTACIONES

### Ayuntamiento

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b> |                           |             |                       | Page 1    |       |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|-----------|-------|
| Released to the following company:                   |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 14:11 SN: 46639-               |              |                       |                           |             | <b>SI Units</b>       |           |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside               |                           | Coldside    |                       |           |       |
| Fluid name   |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                       | 3,240                     |             |                       | 3,240     |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 72,00                 | 62,40                     | 57,40       |                       | 67,00     |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                | 0,0000                    | 0,0000      |                       | 0,0000    |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,20                 | 66,32                     | 62,20       |                       | 62,97     |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                | 275,57                    | 300,00      |                       | 275,37    |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 48,855                | 50,000                    | 49,253      |                       | 50,000    |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                       | 0,51                      |             |                       | 0,51      |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                       | 1,76e-4                   |             |                       | 1,76e-4   |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                       | 17,29                     |             |                       | 17,49     |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                       | 0,03                      |             |                       | 0,03      |       |
| Exchanger Performance                                |              |                       |                           |             |                       |           |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 11448                 | Actual U                  | (W/m2-K)    |                       | 1762,926  |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 11141                 | Required U                | (W/m2-K)    |                       | 1672,904  |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                       | Duty                      | (MegaWatts) |                       | 0,130     |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                       | Area                      | (m2)        |                       | 15,868    |       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                   | Overdesign                | (%)         |                       | 5,38      |       |
| Unit Geometry  |              |                       | Pack Configuration        |             |                       |           |       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                 | Group #                   | 1 2         |                       |           |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 2 / 2                 | Plate Type 1              | 1 1         |                       |           |       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 63 / 62               | Plate Type 2              | 1 1         |                       |           |       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent        | Channels                  | 15 16       |                       |           |       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides        | Hot pass #                | 1 2         |                       |           |       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal              | Cold pass #               | 2 1         |                       |           |       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                | Channel (Total)           | 31          |                       |           |       |
| Plate Geometry                                       |              |                       | Plate Type 1              |             |                       |           |       |
| Channel width  | (mm)         | 230,10                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval            |           |       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 1,803                 | Plate ID                  | (--)        | TL6-B                 |           |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 3,006                 | Chevron angle             | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 2,403                 | Plate Type 2              |             |                       |           |       |
| Port diameter  | (mm)         | 65,00                 | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval            |           |       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 149,61                | Plate ID                  | (--)        | TL6-B                 |           |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 152,40                | Chevron angle             | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1041,40               |                           |             |                       |           |       |
| Port Velocities; m/s                                 |              |                       | Pressure Drop, % of Total |             | Thermal Resistance; % |           |       |
|  | Hot          | Cold                  |                           | Hot         | Cold                  | Hot side  | 15,40 |
| Inlet  | 1,00         | 0,99                  | Channel                   | 96,6        | 96,5                  | Cold side | 15,82 |
| Outlet   | 0,99         | 1,00                  | Other                     | 3,4         | 3,5                   | Fouling   | 62,05 |
|  |              |                       |                           |             |                       | Metal     | 6,72  |



Casa de la cultura

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b> |                           |             |            | Page 1                |       |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------|------------|-----------------------|-------|
| Released to the following company:                   |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 14:37 SN: 46639-               |              |                       |                           |             |            | <b>SI Units</b>       |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside               |                           | Coldside    |            |                       |       |
| Fluid name   |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                       | 2,910                     |             |            | 2,910                 |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 71,70                 | 62,70                     | 57,70       |            | 66,70                 |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                | 0,0000                    | 0,0000      |            | 0,0000                |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,20                 | 66,31                     | 62,20       |            | 63,00                 |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                | 275,95                    | 300,00      |            | 275,75                |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 48,107                | 50,000                    | 48,505      |            | 50,000                |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                       | 0,51                      |             |            | 0,51                  |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                       | 1,70e-4                   |             |            | 1,70e-4               |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                       | 17,12                     |             |            | 17,32                 |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                       | 0,02                      |             |            | 0,02                  |       |
| Exchanger Performance                                |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 11407                 | Actual U                  | (W/m2-K)    |            | 1799,179              |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 11111                 | Required U                | (W/m2-K)    |            | 1567,913              |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                       | Duty                      | (MegaWatts) |            | 0,110                 |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                       | Area                      | (m2)        |            | 14,307                |       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                   | Overdesign                | (%)         |            | 14,75                 |       |
| Unit Geometry  |              |                       | Pack Configuration        |             |            |                       |       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                 | Group #                   | 1 2         |            |                       |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 2 / 2                 | Plate Type 1              | 1 1         |            |                       |       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 57 / 56               | Plate Type 2              | 1 1         |            |                       |       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent        | Channels                  | 14 14       |            |                       |       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides        | Hot pass #                | 1 2         |            |                       |       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal              | Cold pass #               | 2 1         |            |                       |       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                | Channel (Total)           | 28          |            |                       |       |
| Plate Geometry                                       |              |                       | Plate Type 1              |             |            |                       |       |
| Channel width  | (mm)         | 230,10                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 1,803                 | Plate ID                  | (--)        | TL6-B      |                       |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 3,006                 | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 2,403                 |                           |             |            |                       |       |
| Port diameter  | (mm)         | 65,00                 | Plate Type 2              |             |            |                       |       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 135,19                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 152,40                | Plate ID                  | (--)        | TL6-B      |                       |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1041,40               | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |       |
| Port Velocities; m/s                                 |              |                       | Pressure Drop, % of Total |             |            | Thermal Resistance; % |       |
|  | Hot          | Cold                  |                           | Hot         | Cold       | Hot side              | 15,77 |
| Inlet  | 0,90         | 0,89                  | Channel                   | 97,2        | 97,1       | Cold side             | 16,19 |
| Outlet   | 0,89         | 0,90                  | Other                     | 2,8         | 2,9        | Fouling               | 61,17 |
|  |              |                       |                           |             |            | Metal                 | 6,86  |



Centro de Salud Valle de Laciana

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b> |                           |             |            | Page 1                |       |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------|------------|-----------------------|-------|
| Released to the following company:                   |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 15:18 SN: 46639-               |              |                       |                           |             |            | SI Units              |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside               |                           | Coldside    |            |                       |       |
| Fluid name   |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                       | 26,850                    |             |            | 26,850                |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 71,90                 | 62,50                     | 57,50       |            | 66,90                 |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                | 0,0000                    | 0,0000      |            | 0,0000                |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,20                 | 66,21                     | 62,20       |            | 63,13                 |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                | 275,79                    | 300,00      |            | 275,63                |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 48,421                | 50,000                    | 48,749      |            | 50,000                |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                       | 0,49                      |             |            | 0,49                  |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                       | 1,76e-4                   |             |            | 1,76e-4               |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                       | 13,77                     |             |            | 13,93                 |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                       | 0,01                      |             |            | 0,01                  |       |
| Exchanger Performance                                |              |                       |                           |             |            |                       |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 8725,8                | Actual U                  | (W/m2-K)    |            | 1606,811              |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 8502,4                | Required U                | (W/m2-K)    |            | 1214,616              |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                       | Duty                      | (MegaWatts) |            | 1,057                 |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                       | Area                      | (m2)        |            | 175,78                |       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                   | Overdesign                | (%)         |            | 32,29                 |       |
| Unit Geometry  |              |                       | Pack Configuration        |             |            |                       |       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                 | Group #                   | 1 2 3       |            |                       |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 3 / 3                 | Plate Type 1              | 1 1 1       |            |                       |       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 121 / 120             | Plate Type 2              | 1 1 1       |            |                       |       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent        | Channels                  | 20 20 20    |            |                       |       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides        | Hot pass #                | 1 2 3       |            |                       |       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal              | Cold pass #               | 3 2 1       |            |                       |       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                | Channel (Total)           | 60          |            |                       |       |
| Plate Geometry                                       |              |                       | Plate Type 1              |             |            |                       |       |
| Channel width  | (mm)         | 694,50                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 3,988                 | Plate ID                  | (--)        | MX25-M     |                       |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 6,646                 | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 4,588                 |                           |             |            |                       |       |
| Port diameter  | (mm)         | 250,00                | Plate Type 2              |             |            |                       |       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 551,14                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 431,80                | Plate ID                  | (--)        | MX25-M     |                       |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1930,40               | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |       |
| Port Velocities; m/s                                 |              |                       | Pressure Drop, % of Total |             |            | Thermal Resistance; % |       |
|  | Hot          | Cold                  |                           | Hot         | Cold       | Hot side              | 18,41 |
| Inlet  | 0,56         | 0,56                  | Channel                   | 98,4        | 98,4       | Cold side             | 18,90 |
| Outlet   | 0,56         | 0,56                  | Other                     | 1,6         | 1,6        | Fouling               | 56,56 |
|  |              |                       |                           |             |            | Metal                 | 6,13  |



Polideportivo municipal

| <b>HTRI</b>  |                    | <b>Output Summary</b>     |                    |             |                       | Page 1    |       |
|--|--------------------|---------------------------|--------------------|-------------|-----------------------|-----------|-------|
| Released to the following company:                   |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 17:18 SN: 46639-               |                    |                           |                    |             |                       | SI Units  |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| Process Conditions                                   |                    | Hotside                   |                    | Coldside    |                       |           |       |
| Fluid name   |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| Flow rate  | (kg/s)             |                           | 6,650              |             |                       | 6,650     |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)            | 71,80                     | 62,60              | 57,60       |                       | 66,80     |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)               | 0,0000                    | 0,0000             | 0,0000      |                       | 0,0000    |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)            | 67,20                     | 66,24              | 62,20       |                       | 63,08     |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)              | 300,00                    | 275,62             | 300,00      |                       | 275,45    |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)              | 48,751                    | 50,000             | 49,093      |                       | 50,000    |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)              |                           | 0,50               |             |                       | 0,50      |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)           |                           | 1,76e-4            |             |                       | 1,76e-4   |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)               |                           | 14,87              |             |                       | 15,04     |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)               |                           | 0,03               |             |                       | 0,03      |       |
| Exchanger Performance                                |                    |                           |                    |             |                       |           |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)           | 9602,2                    | Actual U           | (W/m2-K)    |                       | 1663,395  |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)           | 9355,1                    | Required U         | (W/m2-K)    |                       | 1345,883  |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid       |                           | Duty               | (MegaWatts) |                       | 0,256     |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid       |                           | Area               | (m2)        |                       | 38,629    |       |
| EMTD   | (Deg C)            | 4,9                       | Overdesign         | (%)         |                       | 23,59     |       |
| Unit Geometry  |                    |                           | Pack Configuration |             |                       |           |       |
| Units in series/parallel                             | (-) 1 / 1          |                           | Group #            | 1 2 3       |                       |           |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (-) 3 / 3          |                           | Plate Type 1       | 1 1 1       |                       |           |       |
| Total plates/channels                                | (-) 79 / 78        |                           | Plate Type 2       | 1 1 1       |                       |           |       |
| Flow configuration                                   | (-) Countercurrent |                           | Channels           | 13 13 13    |                       |           |       |
| Inlet port locations                                 | (-) Opposite Sides |                           | Hot pass #         | 1 2 3       |                       |           |       |
| Flow path  | (-) Diagonal       |                           | Cold pass #        | 3 2 1       |                       |           |       |
| Hot inlet flow direction                             | (-) Upflow         |                           | Channel (Total)    | 39          |                       |           |       |
| Plate Geometry                                       |                    |                           | Plate Type 1       |             |                       |           |       |
| Channel width  | (mm)               | 348,30                    | Manufacturer       | (-)         | Alfa Laval            |           |       |
| Channel spacing                                      | (mm)               | 2,997                     | Plate ID           | (-)         | TL10-P                |           |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)               | 4,995                     | Chevron angle      | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)               | 3,597                     |                    |             |                       |           |       |
| Port diameter  | (mm)               | 107,00                    | Plate Type 2       |             |                       |           |       |
| Tightened pack length                                | (mm)               | 281,18                    | Manufacturer       | (-)         | Alfa Laval            |           |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)               | 228,60                    | Plate ID           | (-)         | TL10-P                |           |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)               | 1346,20                   | Chevron angle      | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Port Velocities; m/s                                 |                    | Pressure Drop, % of Total |                    |             | Thermal Resistance; % |           |       |
|  | Hot                | Cold                      |                    | Hot         | Cold                  | Hot side  | 17,32 |
| Inlet  | 0,76               | 0,75                      | Channel            | 97,1        | 97,1                  | Cold side | 17,78 |
| Outlet   | 0,75               | 0,75                      | Other              | 2,9         | 2,9                   | Fouling   | 58,55 |
|  |                    |                           |                    |             |                       | Metal     | 6,34  |



Colegio público San Miguel

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b>     |                    | Page 1          |                       |           |       |
|--|--------------|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------|-------|
| Released to the following company:                   |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 17:13 SN: 46639-               |              |                           |                    | <b>SI Units</b> |                       |           |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside                   |                    | Coldside        |                       |           |       |
| Fluid name   |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                           | 4,650              |                 | 4,650                 |           |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 71,80                     | 62,50              | 57,50           | 66,80                 |           |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                    | 0,0000             | 0,0000          | 0,0000                |           |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,15                     | 66,15              | 62,15           | 63,03                 |           |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                    | 275,35             | 300,00          | 275,18                |           |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 49,304                    | 50,000             | 49,643          | 50,000                |           |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                           | 0,51               |                 | 0,50                  |           |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                           | 1,76e-4            |                 | 1,76e-4               |           |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                           | 15,14              |                 | 15,31                 |           |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                           | 0,01               |                 | 0,01                  |           |       |
| Exchanger Performance                                |              |                           |                    |                 |                       |           |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 9665,6                    | Actual U           | (W/m2-K)        | 1667,282              |           |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 9418,1                    | Required U         | (W/m2-K)        | 1390,993              |           |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                           | Duty               | (MegaWatts)     | 0,181                 |           |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                           | Area               | (m2)            | 26,589                |           |       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                       | Overdesign         | (%)             | 19,86                 |           |       |
| Unit Geometry  |              |                           | Pack Configuration |                 |                       |           |       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                     | Group #            | 1 2 3           |                       |           |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 3 / 3                     | Plate Type 1       | 1 1 1           |                       |           |       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 55 / 54                   | Plate Type 2       | 1 1 1           |                       |           |       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent            | Channels           | 9 9 9           |                       |           |       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides            | Hot pass #         | 1 2 3           |                       |           |       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal                  | Cold pass #        | 3 2 1           |                       |           |       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                    | Channel (Total)    | 27              |                       |           |       |
| Plate Geometry                                       |              |                           | Plate Type 1       |                 |                       |           |       |
| Channel width  | (mm)         | 348,30                    | Manufacturer       | (--)            | Alfa Laval            |           |       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 2,997                     | Plate ID           | (--)            | TL10-P                |           |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 4,995                     | Chevron angle      | (deg)           | 30,00                 |           |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 3,597                     |                    |                 |                       |           |       |
| Port diameter  | (mm)         | 107,00                    | Plate Type 2       |                 |                       |           |       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 194,85                    | Manufacturer       | (--)            | Alfa Laval            |           |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 228,60                    | Plate ID           | (--)            | TL10-P                |           |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1346,20                   | Chevron angle      | (deg)           | 30,00                 |           |       |
| Port Velocities; m/s                                 |              | Pressure Drop, % of Total |                    |                 | Thermal Resistance; % |           |       |
|  | Hot          | Cold                      |                    | Hot             | Cold                  | Hot side  | 17,25 |
| Inlet  | 0,53         | 0,53                      | Channel            | 98,7            | 98,7                  | Cold side | 17,70 |
| Outlet   | 0,53         | 0,53                      | Other              | 1,3             | 1,3                   | Fouling   | 58,69 |
|  |              |                           |                    |                 |                       | Metal     | 6,36  |



IES Obispo Argüelles. Edificio principal

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b>     |                    | Page 1                |            |
|--|--------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| Released to the following company:                   |              |                           |                    |                       |            |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 17:22 SN: 46639-               |              |                           |                    | SI Units              |            |
| Rating - Single Pass Countercurrent Flow             |              |                           |                    |                       |            |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                           |                    |                       |            |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                           |                    |                       |            |
| Process Conditions                                   |              | Hotside                   |                    | Coldside              |            |
| Fluid name   |              |                           |                    |                       |            |
| Flow rate  | (kg/s)       |                           | 9,810              |                       | 9,810      |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 72,10                     | 62,30              | 57,30                 | 67,10      |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                    | 0,0000             | 0,0000                | 0,0000     |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,20                     | 66,40              | 62,20                 | 63,00      |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                    | 282,02             | 300,00                | 281,95     |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 35,959                    | 50,000             | 36,103                | 50,000     |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                           | 0,46               |                       | 0,46       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                           | 1,76e-4            |                       | 1,76e-4    |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                           | 13,94              |                       | 14,11      |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                           | 0,01               |                       | 0,01       |
| Exchanger Performance                                |              |                           |                    |                       |            |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 10411                     | Actual U           | (W/m2-K)              | 1710,022   |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 10141                     | Required U         | (W/m2-K)              | 1659,900   |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                           | Duty               | (MegaWatts)           | 0,403      |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                           | Area               | (m2)                  | 49,331     |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                       | Overdesign         | (%)                   | 3,02       |
| Unit Geometry  |              |                           | Pack Configuration |                       |            |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                     | Group #            | 1                     |            |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 1 / 1                     | Plate Type 1       | 1                     |            |
| Total plates/channels                                | (--)         | 47 / 46                   | Plate Type 2       | 1                     |            |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent            | Channels           | 23                    |            |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides            | Hot pass #         | 1                     |            |
| Flow path  | (--)         | Diagonal                  | Cold pass #        | 1                     |            |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                    | Channel (Total)    | 23                    |            |
| Plate Geometry                                       |              |                           | Plate Type 1       |                       |            |
| Channel width  | (mm)         | 497,90                    | Manufacturer       | (--)                  | Alfa Laval |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 1,905                     | Plate ID           | (--)                  | TL15-B     |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 3,175                     | Chevron angle      | (deg)                 | 30,00      |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 2,505                     |                    |                       |            |
| Port diameter  | (mm)         | 155,00                    | Plate Type 2       |                       |            |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 115,83                    | Manufacturer       | (--)                  | Alfa Laval |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 330,20                    | Plate ID           | (--)                  | TL15-B     |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 2032,00                   | Chevron angle      | (deg)                 | 30,00      |
| Port Velocities; m/s                                 |              | Pressure Drop, % of Total |                    | Thermal Resistance; % |            |
|  | Hot          | Cold                      |                    | Hot side              | 16,43      |
| Inlet  | 0,53         | 0,53                      | Channel            | 98,8                  | 100,2      |
| Outlet   | 0,53         | 0,53                      | Other              | 1,2                   | -0,2       |
|  |              |                           |                    | Cold side             | 16,86      |
|  |              |                           |                    | Fouling               | 60,19      |
|  |              |                           |                    | Metal                 | 6,52       |





**IES Obispo Argüelles. Edificio entrada**

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b>     |                    | Page 1      |                       |           |       |
|--|--------------|---------------------------|--------------------|-------------|-----------------------|-----------|-------|
| Released to the following company:                   |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 17:27 SN: 46639-               |              |                           |                    |             | <b>SI Units</b>       |           |       |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside                   |                    | Coldside    |                       |           |       |
| Fluid name   |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                           | 5,220              |             | 5,220                 |           |       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 71,70                     | 62,70              | 57,70       | 66,70                 |           |       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                    | 0,0000             | 0,0000      | 0,0000                |           |       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,20                     | 66,19              | 62,20       | 63,06                 |           |       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                    | 276,18             | 300,00      | 276,01                |           |       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 47,645                    | 50,000             | 47,973      | 50,000                |           |       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                           | 0,49               |             | 0,49                  |           |       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                           | 1,76e-4            |             | 1,76e-4               |           |       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                           | 14,54              |             | 14,70                 |           |       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                           | 0,02               |             | 0,02                  |           |       |
| Exchanger Performance                                |              |                           |                    |             |                       |           |       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 9515,1                    | Actual U           | (W/m2-K)    | 1657,779              |           |       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 9261,4                    | Required U         | (W/m2-K)    | 1308,583              |           |       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                           | Duty               | (MegaWatts) | 0,197                 |           |       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                           | Area               | (m2)        | 30,602                |           |       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                       | Overdesign         | (%)         | 26,69                 |           |       |
| Unit Geometry  |              |                           | Pack Configuration |             |                       |           |       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                     | Group #            | 1 2 3       |                       |           |       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 3 / 3                     | Plate Type 1       | 1 1 1       |                       |           |       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 63 / 62                   | Plate Type 2       | 1 1 1       |                       |           |       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent            | Channels           | 10 10 11    |                       |           |       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides            | Hot pass #         | 1 2 3       |                       |           |       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal                  | Cold pass #        | 3 2 1       |                       |           |       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                    | Channel (Total)    | 31          |                       |           |       |
| Plate Geometry                                       |              |                           | Plate Type 1       |             |                       |           |       |
| Channel width  | (mm)         | 348,30                    | Manufacturer       | (--)        | Alfa Laval            |           |       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 2,997                     | Plate ID           | (--)        | TL10-P                |           |       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 4,995                     | Chevron angle      | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 3,597                     |                    |             |                       |           |       |
| Port diameter  | (mm)         | 107,00                    | Plate Type 2       |             |                       |           |       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 223,63                    | Manufacturer       | (--)        | Alfa Laval            |           |       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 228,60                    | Plate ID           | (--)        | TL10-P                |           |       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1346,20                   | Chevron angle      | (deg)       | 30,00                 |           |       |
| Port Velocities; m/s                                 |              | Pressure Drop, % of Total |                    |             | Thermal Resistance; % |           |       |
|  | Hot          | Cold                      |                    | Hot         | Cold                  | Hot side  | 17,42 |
| Inlet  | 0,59         | 0,59                      | Channel            | 98,2        | 98,3                  | Cold side | 17,90 |
| Outlet   | 0,59         | 0,59                      | Other              | 1,8         | 1,7                   | Fouling   | 58,35 |
|  |              |                           |                    |             |                       | Metal     | 6,32  |



IES Obispo Argüelles. Gimnasio

| <b>HTRI</b>  |              | <b>Output Summary</b> |                           |             |            | Page 1                |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------|------------|-----------------------|
| Released to the following company:                   |              |                       |                           |             |            |                       |
| Xphe 7.3.2 21/04/2020 17:37 SN: 46639-               |              |                       |                           |             |            | SI Units              |
| Rating - Symmetric Pass Countercurrent Flow          |              |                       |                           |             |            |                       |
| See Data Check Messages Report for Warning Messages. |              |                       |                           |             |            |                       |
| See Runtime Message Report for Warning Messages.     |              |                       |                           |             |            |                       |
| Process Conditions                                   |              | Hotside               |                           | Coldside    |            |                       |
| Fluid name   |              |                       |                           |             |            |                       |
| Flow rate  | (kg/s)       |                       |                           |             |            |                       |
| Temperature, Inlet/Outlet                            | (Deg C)      | 72,60                 | 62,00                     | 57,00       | 67,60      |                       |
| Weight fraction vapor, Inlet/Outlet                  | (--)         | 0,0000                | 0,0000                    | 0,0000      | 0,0000     |                       |
| Temperature, Average/Skin                            | (Deg C)      | 67,30                 | 66,40                     | 62,30       | 63,12      |                       |
| Pressure, Inlet/Average                              | (kPa)        | 300,00                | 279,03                    | 300,00      | 278,86     |                       |
| Pressure drop, Total/Allow                           | (kPa)        | 41,932                | 50,000                    | 42,273      | 50,000     |                       |
| Nominal channel velocity                             | (m/s)        |                       | 0,47                      |             | 0,47       |                       |
| Fouling resistance                                   | (m2-K/W)     |                       | 1,76e-4                   |             | 1,76e-4    |                       |
| Equivalent shear stress                              | (Pa)         |                       | 14,79                     |             | 14,96      |                       |
| Maldistribution parameter                            | (--)         |                       | 0,04                      |             | 0,04       |                       |
| Exchanger Performance                                |              |                       |                           |             |            |                       |
| Hot film coefficient                                 | (W/m2-K)     | 10789                 | Actual U                  | (W/m2-K)    | 1730,302   |                       |
| Cold film coefficient                                | (W/m2-K)     | 10511                 | Required U                | (W/m2-K)    | 1695,569   |                       |
| Hot regime   | Sens. Liquid |                       | Duty                      | (MegaWatts) | 0,153      |                       |
| Cold regime  | Sens. Liquid |                       | Area                      | (m2)        | 18,469     |                       |
| EMTD   | (Deg C)      | 4,9                   | Overdesign                | (%)         | 2,05       |                       |
| Unit Geometry  |              |                       | Pack Configuration        |             |            |                       |
| Units in series/parallel                             | (--)         | 1 / 1                 | Group #                   | 1 2         |            |                       |
| No. of passes, hot/cold                              | (--)         | 2 / 2                 | Plate Type 1              | 1 1         |            |                       |
| Total plates/channels                                | (--)         | 73 / 72               | Plate Type 2              | 1 1         |            |                       |
| Flow configuration                                   | (--)         | Countercurrent        | Channels                  | 18 18       |            |                       |
| Inlet port locations                                 | (--)         | Opposite Sides        | Hot pass #                | 1 2         |            |                       |
| Flow path  | (--)         | Diagonal              | Cold pass #               | 2 1         |            |                       |
| Hot inlet flow direction                             | (--)         | Upflow                | Channel (Total)           | 36          |            |                       |
| Plate Geometry                                       |              |                       | Plate Type 1              |             |            |                       |
| Channel width  | (mm)         | 230,10                | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |
| Channel spacing                                      | (mm)         | 1,803                 | Plate ID                  | (--)        | TL6-B      |                       |
| Equivalent diameter                                  | (mm)         | 3,006                 | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |
| Average plate pitch                                  | (mm)         | 2,403                 | Plate Type 2              |             |            |                       |
| Port diameter  | (mm)         | 65,00                 | Manufacturer              | (--)        | Alfa Laval |                       |
| Tightened pack length                                | (mm)         | 173,64                | Plate ID                  | (--)        | TL6-B      |                       |
| Horizontal port c-c                                  | (mm)         | 152,40                | Chevron angle             | (deg)       | 30,00      |                       |
| Vertical port c-c                                    | (mm)         | 1041,40               |                           |             |            |                       |
| Port Velocities; m/s                                 |              |                       | Pressure Drop, % of Total |             |            | Thermal Resistance; % |
|  | Hot          | Cold                  |                           | Hot         | Cold       | Hot side              |
| Inlet  | 1,06         | 1,06                  | Channel                   | 95,4        | 95,3       | Cold side             |
| Outlet   | 1,06         | 1,06                  | Other                     | 4,6         | 4,7        | Fouling               |
|  |              |                       |                           |             |            | Metal                 |
|  |              |                       |                           |             |            | 16,04                 |
|  |              |                       |                           |             |            | 16,46                 |
|  |              |                       |                           |             |            | 60,91                 |
|  |              |                       |                           |             |            | 6,59                  |



## ANEXO 4. ESTUDIO ECONÓMICO



## A4. ESTUDIO ECONÓMICO

### INVERSIÓN INICIAL

Para poder estudiar en detalle la inversión inicial de una actuación de la magnitud que se expone en esta memoria es preciso tener en cuenta múltiples aspectos. Para ello, se ha dividido la actuación en capítulos siguiendo los ejemplos de (García-Carro, F.M. & Solís 2019) y (Fernández 2018).

Los capítulos en los que se ha dividido la actuación son los siguientes:

1. Sistema de generación.
2. Zanjas y conducciones.
3. Salas técnicas.
4. Fuerza y control.
5. Seguridad y Salud.
6. Gestión de residuos.
7. Legalizaciones.
8. Rehabilitación de la sala de generación.

#### Sistema de generación

En este capítulo se tienen en cuenta los costes del equipamiento que se tendría que incluir en la sala de generación, así como las tuberías y obras auxiliares que hubiera que acometer en la misma para poder poner en marcha una red de calor. Entre las unidades de obra más importantes se encuentran las enfriadoras, las bombas hidráulicas, el intercambiador de agua de mina y la red hidráulica de la sala (tuberías, instrumentación, valvulería, calorifugado, etc.).

Para conocer los precios actuales del mercado a la hora de la elaboración de este trabajo y poder dar una estimación certera de la inversión inicial se ha contactado con empresas especializadas suministradoras de los productos y equipos diseñados.

- Sistema de bombas de calor agua-agua de alta temperatura modelos 61XWH-ZE-07 y 61XWH-ZE-14, de CARRIER → 468.875,02 €.
- 3 bombas para el circuito distribución con caudal nominal 15,6 l/s, altura de impulsión 64,55 m, y con 10,07 kW de potencia nominal → 29.732,79 €.
- 3 bombas para el circuito condensador con datos de funcionamiento caudal nominal 15,6 l/s, altura de impulsión 3,63 m y con 0,68 kW de potencia → 10.540,92 €.



- 3 bombas para el circuito del evaporador con caudal nominal 30,35 l/s, altura de impulsión 25,65 m y con 9,34 kW de potencia nominal → 28.620,93 €.
- Intercambiador agua de mina 1270 kW → 69.268,06 €.
- Sistema hidráulico con 317,84 m de tubería de acero negro de 8", con un calorifugado de 40 mm de espesor (incluida la instrumentación y valvulería correspondiente) → 141.886,34 €.
- El equipamiento eléctrico de la sala de generación consistente en un cuadro general de baja tensión, tomas de corriente e iluminación → 46.170,80 €.

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 795.094,86 €.

### Zanjas y conducciones

En este capítulo se tiene en cuenta el coste de la obra civil necesaria para ejecutar las zanjas y arquetas, incluyendo su relleno posterior, así como el coste de la instalación de las conducciones que conforman la red de calor. Para conocer el precio de las conducciones se ha contactado un suministrador de la tubería tenida en cuenta, en este caso ITALSAN. Las mediciones se han obtenido del dimensionamiento hidráulico y han sido medidas sobre un visor cartográfico según el trazado propuesto.

- 5.336,07 metros de zanja de los cuatro tipos definidos → 567.473,12 €.
- 118 arquetas → 20.070,71 €.
- 193,46 metros de Tubería PPR FB SDR 9 aisl. DN90 → 11.301,93 €.
- 1.562,52 metros de Tubería PPR FB SDR 9 aisl. DN110 → 121.704,68 €.
- 884,87 metros de Tubería PPR FB SDR 9 aisl. DN125 → 89.309,93 €.
- 2.613,83 metros de Tubería PPR FB SDR 9 aisl. DN200 → 610.486,13 €.
- 5.630,85 metros de Tubería PPR FB SDR 9 aisl. DN250 → 2.284.323,23 €.

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 3.718.917,03 €.

### Salas técnicas

En este capítulo se incluyen las reformas a tener en cuenta en cada una de las salas técnicas de estudio. Los conceptos que se han tenido en cuenta incluyen:

- La obra civil necesaria, como por ejemplo la apertura de huecos en tabiques y sus reposiciones.
- La red hidráulica de la sala incluyendo conducciones, instrumentación y valvulería.



- La subestación de intercambio que produce el intercambio de calor entre el agua de la red de distribución y el sistema de calefacción del edificio.
- Canalizaciones eléctricas y cuadro de geotermia en cada una de las salas.

El coste de la actuación a realizar en cada sala técnica se presenta a continuación:

- Ayuntamiento → 30.757,21 €.
- Casa de la cultura → 34.891,36 €.
- Centro de Salud Valle Laciana → 46.260,83 €.
- Polideportivo → 36.846,54 €.
- Colegio Público San Miguel → 35.919,54 €.
- IES Obispo Argüelles (Principal) → 38.194,73 €.
- IES Obispo Argüelles (Entrada) → 35.177,94 €.
- IES Obispo Argüelles (Gimnasio) → 35.456,04 €.

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 293.504,19 €.

### Fuerza y control

En este capítulo se incluye el cableado de fuerza y de control, todos los equipos necesarios para el control (SCADA, programación, ordenadores, SAI, etc.) y las canaletas eléctricas por donde discurrirá el cableado.

- Equipos de control de todas las salas, incluyendo la sala de generación → 31.108,07€.
- Cableado de control → 29.545,94 €.
- Cableado de fuerza → 26.275,66 €.
- Bandejas y canalizaciones eléctricas → 11.529,32 €.

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 98.458,99 €.

### Seguridad y Salud

Toda obra de construcción debe tener un presupuesto para salvaguardar la Seguridad y la Salud de la obra. Por lo tanto, se considera indispensable tener en cuenta este coste en la inversión inicial, ya que es un desembolso que tendrá que hacer el promotor.

Se estima un coste de 62.076,88 €, el cual está por encima del 1% del presupuesto de ejecución material, práctica habitual en proyectos de construcción de (García-Carro, F.M. & Solís 2019)(Fernández 2018).



## Gestión de Residuos

Toda obra de construcción debe tener un presupuesto para la Gestión de los Residuos generados en la propia obra. Por lo tanto, se considera indispensable tener en cuenta este coste en la inversión inicial, ya que es un desembolso que tendrá que hacer el promotor.

Se estima un coste de 76.047,15 €, el cual está en el entorno del 1,5% del presupuesto de ejecución material, práctica habitual en proyectos de construcción (García-Carro, F.M. & Solís 2019)(Fernández 2018).

## Legalizaciones

Tras acometer todas las obras, es necesario que la instalación se legalice y se añada a un número de expediente o se le asigne uno nuevo. De esta manera, se identifica la instalación ante el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Para ello, es necesario pasar una inspección por parte de un Organismo de Control Autorizado (OCA). En concreto, sería necesario pasar la OCA de baja tensión y de instalación térmica según el RITE (Ministerio de la Presidencia 2013).

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 14.082,12 €.

## Rehabilitación de la sala de generación

La nave elegida para albergar la sala de generación es una nave situada en las instalaciones del pozo Calderón. Esta nave lleva abandonada más de 10 años con su correspondiente deterioro. Para poder albergar la nave de generación en condiciones de seguridad y comodidad, es necesario acondicionarla.

Las actuaciones más importantes a llevar a cabo en este capítulo son las siguientes:

- Demoliciones, limpieza y actuaciones previas → 47.392,10 €.
- Construcción de red de saneamiento y drenaje → 2.073,20 €.
- Albañilería interior y mejora de la solera → 20.545,63 €.
- Acondicionamiento de cubierta y carpintería metálica → 15.252,13 €.
- Pintura de paramentos y superficies metálicas → 14.582,77 €.

El coste de este capítulo asciende a la cantidad de 99.845,83 €.



### Presupuesto estimado de la actuación e inversión inicial

La suma de los costes de los diversos capítulos expuestos en los apartados anteriores deja de manifiesto el Presupuesto de Ejecución Material:

|  |              |
|--|--------------|
| SISTEMA DE GENERACIÓN.....             | 795.094,86   |
| ZANJAS Y CONDUCCIONES.....             | 3.718.917,04 |
| SALAS TÉCNICAS.....                    | 293.504,19   |
| FUERZA Y CONTROL.....                  | 98.458,99    |
| SEGURIDAD Y SALUD.....                 | 62.076,88    |
| GESTIÓN DE RESIDUOS.....               | 76.047,15    |
| LEGALIZACIONES.....                    | 14.082,12    |
| REHABILITACIÓN SALA DE GENERACIÓN..... | 99.845,83    |

El presupuesto de ejecución material de la actuación asciende a 5.157.027,06 €.

En los proyectos de construcción se tienen en cuenta los Gastos Generales del contratista y el Beneficio Industrial que de la empresa por su trabajo. Estos importes corresponden al 13% y al 6% del PEM.

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL ... | 5.157.027,06 |
| 13 % Gastos generales.....            | 670.413,52   |
| 6 % Beneficio industrial.....         | 309.421,62   |
| VALOR ESTIMADO DEL CONTRATO .....     | 6.136.862,20 |
| 21 % I.V.A.....                       | 1.288.741,06 |
| PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN .....  | 7.425.603,26 |

La inversión inicial considerada en este estudio económico asciende a la cantidad de 6.136.862,20 €.

### Discusión al respecto de la inversión inicial

Como se puede observar en el apartado anterior, la inversión inicial obtenida tras estudiar detalladamente todos los posibles costes de la actuación es mucho mayor a la obtenida en el apartado 6.4.1.3. En este apartado se estimó la inversión inicial de aprovechamientos geotérmicos en el agua de mina con el fin de comparar las distintas alternativas. Esta





estimación fue realizada a través de parámetros obtenidos de la bibliografía y se tuvieron en cuenta únicamente tres conceptos, sala de generación, conducciones y salas técnicas.

Comparando ambas estimaciones se observa que la gran diferencia es debida al coste de las conducciones. Tras realizar un estudio hidráulico detallado se ha podido definir el diámetro de tubería óptimo en la red, sin embargo, es bastante más grande que el consultado en bibliografía, debido a las pérdidas de carga. Esto hace que el coste por metro lineal de tubería se dispare y por ello el coste total de la actuación sea tan alto.

Es preciso señalar, además, que en el estudio económico se han tenido en cuenta muchos más conceptos que en el estudio de alternativas y que estos conceptos aumentan el coste de la actuación.

## ESTUDIO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN

En este estudio de retorno de la inversión se van a calcular dos parámetros fundamentales, el VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Rendimiento).

La fórmula utilizada para calcular el VAN es la siguiente (Castro 2001):

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{(1+d)^n}$$

Donde:

VAN = Valor Actual Neto de la actuación.

I = Valor de inversión inicial.

$S_i$  = Saldo del flujo neto anual de caja en el año  $i$ .

$n$  = total de años en el periodo de vida útil de la actuación.

$d$  = Tasa de descuento planteada para la inversión.

$i$  = año del período de vida útil económico.

El TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN se igual a 0 (Castro 2001).



Como saldo del flujo anual de caja se considera la diferencia entre el beneficio que se puede obtener por la venta de la energía térmica (B) y el coste de operación y mantenimiento de la instalación (O&Mg). De esta manera la expresión del VAN quedaría de la siguiente manera:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{(B - O\&Mg)_i}{(1 + d)^n}$$

Se ha considerado que la condición para que una actuación sea rentable es que el VAN sea positivo cuando la tasa de descuento es del 8% (Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Fernández-Oro, J. M.; Loredó, J. & Díaz-Aguado 2020), o lo que es lo mismo, que el TIR de la actuación sea superior al 8%.

### Costes de operación y mantenimiento

Para calcular los costes de operación y mantenimiento del aprovechamiento energético de las aguas de mina del Valle Laciana se utiliza la expresión propuesta por (Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Fernández-Oro, J. M.; Loredó, J. & Díaz-Aguado 2020):

$$O\&Mg = 65.792 P + 6.334,3$$

Siendo P la potencia instalada de la instalación en MW, en nuestro caso 1,9 MW. Por lo tanto, el coste de operación y mantenimiento de la instalación es 131.339,10 €/año.

### Beneficios

Los beneficios que se obtienen por el operador de la red de calor son los que se obtienen de vender la energía térmica a los distintos consumidores. Estos contratos entre operadores y consumidores son privados y pueden variar enormemente entre las tarifas y condicionantes que se establezcan entre ambos.

Para poder estimar unos beneficios de la red de calor de Villablino se va a considerar el precio de kWh vendido reflejado en (Menéndez, J.; Ordóñez, A.; Fernández-Oro, J. M.; Loredó, J. & Díaz-Aguado 2020) y obtenido de datos del OMIE en el año 2020. Este valor corresponde a 0,045 € por kWh vendido.

En la tabla nº170 del apartado 7.2.7.1. del estudio de demanda llevado a cabo en este trabajo se recoge la demanda térmica de los posibles clientes de la red de calor a lo largo del año. La suma de todos los valores recogidos en esa tabla supone los kWh demandados por el sistema el día un de todos los meses en un año. Esta suma asciende a la cantidad de 134.698,11



kWht. Si se tiene en cuenta que un mes medio a lo largo del año tiene 30 días, se obtiene una demanda de 4.040.943,24 kWht en todo el año.

Al considerar que se pueden obtener 0,045 € por cada kWht vendido, se obtienen unos beneficios anuales de 181.842,45 € .

### Valor actual neto (VAN)

Aplicando la fórmula del VAN y considerando que la instalación tiene una vida útil de 25 años, se obtiene un valor actual neto de -5.597.750,28 €.

El balance económico anual de la red de calor de Villablino, utilizado para calcular el VAN, se puede ver en la tabla nº215:

| Año | Balance económico anualizado | VAN              |
|-----|------------------------------|------------------|
| 1   | 46.762,36 €                  | - 5.597.750,28 € |
| 2   | 43.298,48 €                  |                  |
| 3   | 40.091,18 €                  |                  |
| 4   | 37.121,47 €                  |                  |
| 5   | 34.371,73 €                  |                  |
| 6   | 31.825,67 €                  |                  |
| 7   | 29.468,22 €                  |                  |
| 8   | 27.285,39 €                  |                  |
| 9   | 25.264,25 €                  |                  |
| 10  | 23.392,82 €                  |                  |
| 11  | 21.660,02 €                  |                  |
| 12  | 20.055,57 €                  |                  |
| 13  | 18.569,98 €                  |                  |
| 14  | 17.194,42 €                  |                  |
| 15  | 15.920,76 €                  |                  |
| 16  | 14.741,45 €                  |                  |
| 17  | 13.649,49 €                  |                  |
| 18  | 12.638,41 €                  |                  |
| 19  | 11.702,23 €                  |                  |
| 20  | 10.835,40 €                  |                  |
| 21  | 10.032,78 €                  |                  |
| 22  | 9.289,61 €                   |                  |
| 23  | 8.601,49 €                   |                  |
| 24  | 7.964,34 €                   |                  |
| 25  | 7.374,39 €                   |                  |

Tabla nº215. Balance económico anualizado de la red de calor de Villablino.