



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS,
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER N° TFM18010115

PROYECTO DE AMPLIACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE UN NUEVO COMPRESOR

MEMORIA

D. GÓMEZ ESCALANTE, PABLO

TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER

FECHA: Julio 2018



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1.- INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1.- Objetivo | 1 |
| 1.2.- Alcance | 2 |
| 1.3.- Normativa | 2 |
| 2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN | 4 |
| 2.1.- Descripción de la situación actual | 6 |
| 2.1.1.- Gijón II..... | 7 |
| 2.1.2.- Gijón III..... | 7 |
| 2.2.- Planteamiento del problema | 7 |
| 2.3.- Solución adoptada..... | 8 |
| 2.3.1.- Compresor seleccionado | 9 |
| 3.- ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA | 11 |
| 3.1.- Datos compresores en 2017 | 11 |
| 3.1.1.- Cantidad N ₂ suministrada en 2017..... | 12 |
| 3.2.- Cálculo de la eficiencia energética | 13 |
| 3.2.1.- Mejora de la eficiencia energética | 13 |
| 3.3.- Energía consumida 2017..... | 15 |
| 3.3.1.- Energía consumida por compresores actuales a plena capacidad: BLNC#2 y BLNC-GII | 15 |
| 3.3.2.- Energía que consumiría el Nuevo compresor | 16 |
| 3.4.- Coste energía..... | 16 |
| 3.5.- Ahorro de energía en 2017..... | 18 |
| 3.5.1.- Otros posibles ahorros producidos en 2017 | 18 |
| 3.5.2.- Reducción de energías primarias y emisiones en 2017..... | 19 |
| 4.- INSTALACIÓN NUEVO COMPRESOR | 21 |
| 4.1.- Situación inicial | 21 |
| 4.2.- Análisis de soluciones..... | 21 |
| 4.3.- Planificación de sustitución | 23 |
| 4.3.1.- Diagrama de Gant | 24 |
| 4.4.- Modificación de equipos a presión | 24 |



| | |
|--|----|
| 4.4.1.- Modificación N°1: Carrete embridado en 8"-NG2-CS300A (Primer Nitroducto) para conexión de 8"-NG2A-CS300A (Segundo Nitroducto)..... | 24 |
| 4.4.2.- Modificación N°2: T conexión línea 8"-NG2A-CS300A con 8"-NG3-CS300A en zona del M9 | 25 |
| 4.5.- Equipos de nueva instalación..... | 25 |
| 4.5.1.- Compresor de nitrógeno BLNC#2 | 25 |
| 4.5.2.- Cooling Water Supply..... | 26 |
| 4.5.3.- Cooling Water Return | 26 |
| 4.5.4.- Aftercooler | 26 |
| 5.- ESTUDIO INSTALACIÓN NUEVO NITRODUCTO | 27 |
| 5.1.- PÉRDIDAS DE CARGA | 27 |
| 5.1.1.- Pérdidas lineales..... | 27 |
| 5.1.2.- Pérdidas singulares..... | 29 |
| 5.2.- Datos y cálculos previos | 30 |
| 5.3.- Pérdidas nitroducto actual..... | 31 |
| 5.3.1.- Cálculo pérdidas de carga | 32 |
| 5.4.- Pérdidas nitroducto nuevo | 34 |
| 5.4.1.- Cálculo pérdidas de carga | 35 |
| 5.5.- Comparación de pérdidas..... | 37 |
| 5.5.1.- Primera comparación | 38 |
| 5.5.2.- Segunda comparación | 43 |
| 6.- INSTALACIÓN NUEVO NITRODUCTO | 48 |
| 6.1.- Descripción | 48 |
| 6.2.- Condiciones de trabajo y diseño | 49 |
| 6.3.- Cálculos esfuerzos | 49 |
| 6.3.1.- Materiales..... | 49 |
| 6.3.2.- Datos de cálculo | 49 |
| 6.3.3.- Cálculo a presión..... | 51 |
| 6.3.4.- Esfuerzos o cargas para el cálculo | 52 |
| 6.3.5.- Cálculo a esfuerzos combinados (flexión+presión)..... | 53 |
| 6.3.6.- Cálculo flexibilidad..... | 57 |
| 6.3.7.- Cálculo de bridas..... | 59 |
| 6.4.- Cálculo de soportes | 59 |



| | |
|--|----|
| 6.4.1.- Diseño basado en peso de soportes | 61 |
| 6.4.2.- Esfuerzos soportes..... | 62 |
| 7.- ANÁLISIS DEL AHORRO ENERGÉTICO | 84 |
| 7.1.- Ahorro Producido por el BLNC#1..... | 85 |
| 7.2.- Ahorro producido por el nuevo BLNC#2 | 85 |
| 8.- ANÁLISIS DEL AHORRO ECONÓMICO | 87 |
| 8.1.- Análisis de la rentabilidad | 87 |
| 8.1.1.- Valor actual neto | 88 |
| 8.1.2.- Tasa interna de retorno..... | 89 |
| 9.- BIBLIOGRAFÍA | 90 |



ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1.-Temperatura de ebullición a 5,5 bar. | 5 |
| Tabla 3.1.- Datos iniciales funcionamiento compresores actuales | 11 |
| Tabla 3.2.-Caudal másico impulsado por cada compresor en 2017..... | 12 |
| Tabla 3.3.-Cantidad total de N ₂ suministrada por cada compresor en 2017 | 12 |
| Tabla 3.4.-Eficiencia energética compresores actuales..... | 13 |
| Tabla 3.5.-Datos funcionamiento BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad | 14 |
| Tabla 3.6.- Eficiencia energética BLNC#2 y BLNC a plena capacidad..... | 14 |
| Tabla 3.7.-Datos funcionamiento Nuevo Compresor para 11.000 Nm ³ /h..... | 14 |
| Tabla 3.8.-Eficiencia energética Nuevo Compresor para 11.000 Nm ³ /h..... | 14 |
| Tabla 3.9.-Datos funcionamiento, energía consumida y eficiencia energética Nuevo Compresor para 12.000 Nm ³ /h..... | 15 |
| Tabla 3.10.- Datos funcionamiento, energía consumida y eficiencia energética Nuevo Compresor para 13.000 Nm ³ /h..... | 15 |
| Tabla 3.11.- Energía consumida BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad..... | 16 |
| Tabla 3.12.-Energía consumida Nuevo Compresor para 11.000 Nm ³ /h..... | 16 |
| Tabla 3.13.- Comparación Energía consumida para 11.000 Nm ³ /h..... | 18 |
| Tabla 3.14.-Energía consumida Nuevo BLNC#2 para 12.000 Nm ³ /h y 13.000 Nm ³ /h | 18 |
| Tabla 3.15.- Ahorro energético y económico Nuevo BLNC#2 para 12.000 Nm ³ /h y 13.000 Nm ³ /h..... | 19 |
| Tabla 3.16.-Ahorro en energía final..... | 20 |
| Tabla 5.1.-Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Primer escenario..... | 33 |
| Tabla 5.2.- Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Segundo escenario..... | 34 |
| Tabla 5.3.- Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Tercer escenario | 34 |
| Tabla 5.4.- Pérdidas de carga Nitroducto Nuevo-Cuarto escenario..... | 37 |
| Tabla 5.5.- Pérdidas de carga Nitroducto Nuevo-Quinto escenario..... | 37 |
| Tabla 5.6.-Primera comparación pérdidas de carga | 38 |
| Tabla 5.7.-Ganancia de presión primera comparación..... | 39 |
| Tabla 5.8.-Presión de descarga primera comparación | 40 |
| Tabla 5.9.-Potencia generada BLNC#1 primera comparación 22.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 40 |



| | |
|--|----|
| Tabla 5.10.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 11.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 41 |
| Tabla 5.11.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 22.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 41 |
| Tabla 5.12.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 11.000 Nm ³ /h por Nitroducto Nuevo. | 42 |
| Tabla 5.13.- Segunda comparación pérdidas de carga..... | 43 |
| Tabla 5.14.- Ganancia de presión segunda comparación..... | 44 |
| Tabla 5.15.- Presión de descarga segunda comparación..... | 45 |
| Tabla 5.16.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 23.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 45 |
| Tabla 5.17.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 11.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 46 |
| Tabla 5.18.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 23.216,1625 Nm ³ /h por Nitroducto Actual. | 46 |
| Tabla 5.19.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 11.000 Nm ³ /h por Nitroducto Nuevo. | 46 |
| Tabla 6.1.-Propiedades mecánicas | 49 |
| Tabla 6.2.-Pesos y diámetro exterior de tuberías sobre los soportes | 62 |
| Tabla 7.1.-Porcentaje suministrado por antiguo BLNC#2 y BLNC-GII..... | 85 |
| Tabla 7.2.-Cantidad total suministrada estimada futuro por antiguo BLNC#2 y BLNC-GII..... | 85 |
| Tabla 7.3.- Energía consumida estimada futuro antiguo BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad | 86 |
| Tabla 7.4.-Eficiencia energética futura nuevo BLNC#2..... | 86 |
| Tabla 8.1.-Flujo de carga | 89 |
| Figura 2.1.-Diagrama de proceso simplificado (Praxair)..... | 4 |
| Figura 2.2.- Curvas de funcionamiento del nuevo compresor | 10 |
| Figura 3.1.-Componentes y precio de la electricidad..... | 17 |
| Figura 3.2.- Factores de paso de Energía Final | 19 |
| Figura 4.1.-Planificación instalación nuevo compresor (Gant) | 24 |
| Figura 5.1.- Coeficiente de pérdidas de carga singulares (K)..... | 30 |



| | |
|---|----|
| Figura 6.1.-Representación simplificada de fuerza aplicada sobre un vano del nitroducto..... | 53 |
| Figura 6.2.-Representación fuerzas internas de tubería en operación..... | 54 |
| Figura 6.3.-Representación fuerzas internas de tubería en prueba hidrostática..... | 55 |
| Figura 6.4.-Esquema cálculo de flexibilidad..... | 58 |
| Figura 6.5.- Distancia máxima de separación entre puntos fijos. | 60 |
| Figura 6.6.- Gráfica separación puntos fijos. | 60 |
| Figura 6.7.- Tramos nitroducto 8”-NG2A-CS300A. | 61 |
| Figura 6.8.-Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 1..... | 63 |
| Figura 6.9.-Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 1..... | 64 |
| Figura 6.10.-Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 1..... | 65 |
| Figura 6.11.-Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 1..... | 66 |
| Figura 6.12.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre soporte..... | 67 |
| Figura 6.13.-Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 1..... | 68 |
| Figura 6.14.- Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 2..... | 70 |
| Figura 6.15.- Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 2..... | 71 |
| Figura 6.16.- Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 2..... | 72 |
| Figura 6.17.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 2..... | 73 |
| Figura 6.18.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre soporte del tramo 2..... | 74 |
| Figura 6.19.-Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 2..... | 75 |
| Figura 6.20.-Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 3..... | 77 |
| Figura 6.21.- Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 3..... | 78 |
| Figura 6.22.- Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 3..... | 79 |
| Figura 6.23.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 3..... | 80 |



| | |
|---|----|
| Figura 6.24.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 3..... | 81 |
| Figura 6.25.- Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 3..... | 82 |



1.- INTRODUCCIÓN

Este proyecto es realizado con la empresa Praxair España S.L.U., la cual se dedica a la producción y venta de oxígeno, nitrógeno y argón a partir del aire que capta directamente de la atmósfera. La empresa dispone de dos métodos de producción, uno por destilación criogénica y otro por separación. Este proyecto está únicamente relacionado con el proceso de destilación criogénica.

1.1.- OBJETIVO

El presente documento tiene como objetivo definir las condiciones técnicas, legales y de seguridad bajo las que se ha de ejecutar este proyecto, consistente en la sustitución de un compresor de nitrógeno por otro que hay actualmente y en la modificación de varias tuberías existentes para la conducción de nitrógeno gas a baja y media presión hasta los compresores de nitrógeno de Gijón III y realizar un desdoblamiento de una tubería existente para la conducción de nitrógeno desde la descarga de los compresores de la planta de Gijón III hasta el medidor Venturi M9 que posteriormente se continua la conducción hasta los Puros de Nitrógeno de ArcelorMittal Gijón.

Ante una demanda creciente por parte de nuestro cliente anteriormente mencionado, se hace necesario aumentar la capacidad de envío de nitrógeno desde la planta de Gijón III y reducir las pérdidas de carga asociadas al mayor caudal que circulará por la canalización existente. El incremento en el suministro no supone un incremento en la capacidad de producción, ya que este nitrógeno que ahora se va a aprovechar, hasta ahora venía siendo un excedente del proceso existente.

Debido a esta demanda creciente por parte del cliente, y en base a ello se realiza un nuevo contrato en el cual Praxair deberá aumentar el suministro, por lo que supondrá un sobreesfuerzo energético, en dos de los tres compresores que están en funcionamiento actualmente. Por este motivo se ha decidido usar un nuevo compresor de nitrógeno de mayor capacidad en lugar de los dos mencionados previamente, con esto se consigue que, para un mismo o mayor suministro que la mayor capacidad de los dos actuales funcionando combinadamente y para la misma presión de descarga, el gasto energético será menor y con menor esfuerzo, logrando de esta forma ganar en eficiencia energética.

Para lograr la mayor capacidad de suministro demandada y a la par tener un menor gasto energético se ha sustituido un compresor que estaba instalado previamente por otro de mayor capacidad de un tamaño parecido que el de mayor capacidad en origen, dejando al compresor sustituido para un futuro proyecto de instalación en paralelo con los otros dos compresores. El incremento en el suministro asociado a la utilización conjunta de los dos compresores supone aumentar el doble el caudal circulante. Si tenemos en cuenta que las pérdidas de carga siguen una función cuadrática de la velocidad, con los dos compresores y



la tubería existente habrá una pérdida de carga cuatro veces superior a la inicial, lo que acarrea un mayor gasto energético y una merma en las prestaciones de las máquinas.

A la vista de lo anterior, parece clara la necesidad de dotar a la instalación con otra tubería de nitrógeno de descarga adicional hasta el M9, de manera que las pérdidas de carga se mantengan o incluso se reduzcan en lo posible y así evitar el sobreesfuerzo energético y ganar en eficiencia.

1.2.- ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente proyecto son las instalaciones relacionadas con la compresión y conducción de nitrógeno gas desde la Planta de Gijón III hacia el medidor M9. Estas instalaciones se componen de dos compresores y una tubería (con sus elementos accesorios de corte, unión y protección) para el suministro de nitrógeno gas de alta pureza, a media presión, desde la planta de Praxair en Gijón III hasta entroncar con el nitroducto hacia los Puros de ArcelorMittal. Desde la Planta de Gijón III, donde se pretende instalar el compresor nuevo, hasta donde se llevará la nueva tubería en la zona del medidor M9 hay unos 113 m de recorrido por un rack de tuberías existente. Para una mayor información ver el documento “Planos”.

Se realizarán distintas labores y estudios en este proyecto, algunas de ellas son puramente académicas.

- Estudio de la eficiencia energética
- Estudio del gasto y ahorro energético
- Diseño nuevo sistema de tuberías
- Diseño de elementos auxiliares.
- Diseño de segundo nitroducto
- Estudio de las pérdidas de carga
- Estudio de los esfuerzos en el nitroducto y soportes
- Análisis energético
- Análisis económico
- Planos de situación y tuberías.

1.3.- NORMATIVA

- DIRECTIVA 2014/68/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de mayo de 2014 relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión.
- Reglamento de Equipos a Presión, R.D. 2060/2008, de 12 de diciembre.
- Real Decreto 769/1999, de 7 de mayo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y de Consejo, 97/23/CE, relativa



a los equipos de presión y se modifica el Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril que aprobó el Reglamento de Aparatos a Presión.

- Reglamento de Aparatos a Presión, R.D. 1244/1979, de 4 de abril.
- Código de Diseño: ASME VIII Div. 1, Ed. 2015.
- Normas DIN, EN, ASTM y ASME relativas a materiales y soldadura.



2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

La empresa Praxair dispone de cinco plantas en el Enclave Asturias: Gijón II, Gijón III, Avilés, Tabaza y la VPSA de Gijón. Las cuatro primeras son plantas de producción por destilación criogénica y la VPSA es una planta de generación por separación. Todas las plantas se encuentran interconectadas para asegurar el suministro a los clientes que están conectados a la red donde el principal consumidor es ArcelorMittal. Para los clientes no conectados directamente mediante el sistema de tuberías, el reparto de los gases se produce en camiones criogénicos que transportan el gas licuado.

El compresor de nitrógeno a sustituir es el que se encuentra en la planta de Gijón III. El diagrama de proceso simplificado es el que se muestra en la Figura 2.1.

Figura 2.1

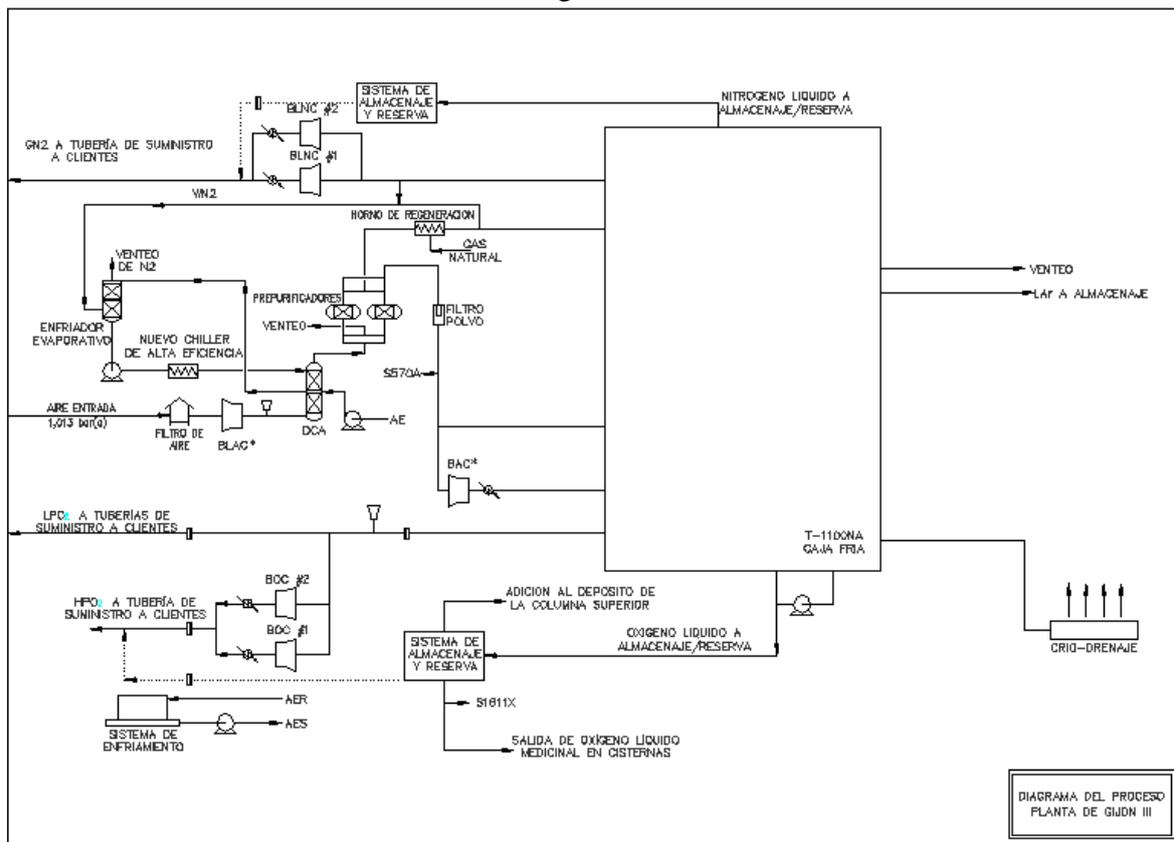


Figura 2.1.-Diagrama de proceso simplificado (Praxair)

El aire aspirado de la atmósfera pasa por un filtro por el que se eliminan las partículas más grandes para ser enviado al compresor de aire (BLAC), el cual eleva la presión del aire hasta los 13 bar y mueve un caudal de $70.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A continuación, el aire comprimido se lleva a la DCA, una columna donde se enfría el aire hasta los 4°C y se elimina parte del vapor de agua existente en el aire. La utilidad de este paso determina el funcionamiento del



siguiente, ya que los prepurificadores de aire, los cuales utilizan un lecho de alúmina y molécula (13X) para la adsorción de contaminantes del aire y ésta última es muy sensible a la presencia de agua. La alúmina se encarga de la absorción del 97% del agua restante mientras que la molécula absorbe el resto del agua presente, el CO₂, el acetileno y los compuestos carbonados (C₄₊ y C₃₊). Estos prepurificadores están duplicados y funcionan alternativamente en ciclos de 4-8 horas y han de ser regenerados para eliminar la humedad absorbida y poder reutilizar la molécula. Tras la eliminación de contaminantes el aire se hace circular por un filtro de polvo que elimina las partículas restantes.

El aire limpio necesita prepararse para la separación, y para ello se ha de alcanzar la temperatura de rocío de los componentes del gas (nitrógeno, oxígeno y argón). Para ello se intercambia calor en el intercambiador de calor primario (PHX) con los gases producto que se encuentran por debajo de -157°C. De esta forma los gases producto alcanzan la temperatura ambiente y el aire que entrará en las columnas de destilación alcanza los -145°C.

Tras el PHX se encuentran las dos columnas, la inferior y la superior. Alrededor de una sexta parte del aire se envía a la columna superior y el resto a la inferior. Ésta última se encuentra a más presión que la columna superior por lo que la parte del aire enviada a esta columna se extrae en mitad del proceso y es enviada a la turbina de expansión de la columna superior, en ella el gas pasa de estar a una presión de unos 13 bar a 1.5 y su temperatura desciende desde los -100°C a los -167°.

El resto del aire se envía a la columna inferior dividiéndose en el camino en dos flujos, uno pasa a través de un intercambiador llamado superheater que enfría el aire y calienta el nitrógeno que entrará posteriormente en el intercambiador de calor primario. De esta forma se consigue bajar la temperatura del aire hasta los -167°C. El resto del caudal se expande en la turbina de la columna inferior reduciendo la temperatura y la presión hasta los -167°C y 6 bar respectivamente. Ambas corrientes se unen ya dentro de la columna inferior.

A 6 bar y -167°C el nitrógeno es gas mientras que el oxígeno y el argón se encuentran en estado líquido.

| Fluido a 5.5 Bar | Temperatura de ebullición (°C) |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Nitrógeno | -177.95 |
| Oxígeno | -165.95 |
| Argón | -162.95 |

Tabla 2.1.-Temperatura de ebullición a 5,5 bar.

De esta forma se obtiene gas en la parte superior, el cual es en su mayoría nitrógeno, y líquido en la parte inferior, el cual es en su mayor parte oxígeno y argón. El líquido extraído se envía al superheater para ser intercambiado con los productos otra vez y enfriar aún más



para ser posteriormente conducido a la parte media de la columna superior. El gas extraído se recircula con el condensador principal de la columna superior licuando éste y reenviándolo a la columna inferior.

En la columna superior los flujos entrantes son el aire expandido en la turbina de la columna superior y el líquido extraído de la columna inferior. En esta columna el oxígeno se encuentra en estado líquido en su totalidad y se extrae como producto desde la parte inferior con un 99% de pureza. El nitrógeno en forma de gas criogénico se extrae desde la parte superior con una pureza de prácticamente el 100% (menos de 10 ppm de oxígeno). El nitrógeno extraído en la parte media-alta de la columna es de deshecho, esta mezcla tiene una pureza en nitrógeno de en torno al 95% por lo que no es vendible. Esta mezcla se utiliza en otros procesos como intercambio de calor aprovechando así su baja temperatura y para la regeneración de los prepurificadores.

En el tramo medio-bajo de la columna superior se extrae gas criogénico en el cual hay una mezcla de nitrógeno, oxígeno y argón, donde éste último es más significativo. Dicha mezcla se envía a la refinería de Argón, que no es más que una tercera columna donde se separa el gas otra vez y se extrae ya el argón.

Tanto el nitrógeno como el oxígeno utilizados como productos y tras intercambiar su baja temperatura para enfriar el aire entrante son impulsados a la red con sus respectivos compresores booster, los cuáles elevan la presión hasta los 24 barg aprox. en el caso de los de oxígeno y a los 16,5 barg aprox. en el caso de los de nitrógeno.

En el proceso también se producen unas extracciones en la columna que son enviadas a almacenaje. En el caso del oxígeno se envía a tanque en estado líquido y en el caso del nitrógeno han de pasar previamente por el licuefactor para cambiar su estado de gas a líquido.

2.1.- DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

La planta de producción de Gijón se divide en dos plantas diferentes pero interconectadas entre sí: Gijón II y Gijón III. La situación de ambas plantas se puede observar en el plano nº2 del documento “Planos”.

En cada una de las dos plantas existe un sistema de compresión de nitrógeno, los cuales son los encargados de comprimir el nitrógeno a baja presión que se les envía para impulsarlo posteriormente a media presión y suministrar el caudal que marca la demanda por parte del cliente.

El caudal de nitrógeno a media presión suministrado por ambas plantas que entra en el medidor Venturi M9, el cual es un medidor de caudal y presión, debe llegar a una presión de 16 barg o superior, según el contrato establecido con ArcelorMittal.



2.1.1.- Gijón II

La instalación del proyecto original en la planta de Gijón II consiste en un compresor centrífugo de 3 etapas con un motor de una potencia de 1,4 MW que impulsa un caudal de 7.000 Nm³/h a 16,2 barg aproximadamente llamado BLNC que entronca directamente con el M9.

En Gijón II se encuentra el medidor Venturi M9. En la zona del M9 se junta el caudal procedente de los compresores de Gijón III con el caudal que impulsa el compresor en esta planta.

Se ejecutó y puso en servicio el año 1972 a la vez que la planta de producción.

El plano de situación de GII se puede ver en el documento “Planos”, el cual es el plano n^o2 y se denomina: SIT-000-GIJÓN.

2.1.2.- Gijón III

La instalación del proyecto original en la planta de Gijón III consiste en dos compresores centrífugos, uno de cuatro etapas con un motor de una potencia de 1,85 MW que impulsa un caudal de 12.000 Nm³/h a 16,5 barg aproximadamente llamado BLNC#1 y otro de tres etapas con un motor de una potencia de 1,4 MW que impulsa un caudal de 4.000 Nm³/h a 16,5 barg aproximadamente llamado BLNC#2 y una tubería de nitrógeno (nitroducto) de diámetro nominal 8” STD (espesor 8,18 mm) ASME B 36.10/19, construida en acero al carbono SA-106-Gr.B llamada 8”-NG2-CS300A, para suministrar el nitrógeno que sale de los compresores desde la Planta de Gijón III hasta los clientes en la zona del M9 (Gijón II).

Se ejecutó y puso en servicio el año 1996 a la vez que la planta de producción. La tubería tiene una longitud de unos 112 m, discurre por un rack de tuberías, que va desde la salida del BLNC#2 actual en Gijón III hacia la zona del M9 en Gijón II, la cual posteriormente entronca hacia los puros de Nitrógeno de ArcelorMittal Gijón, junto con otras dos tuberías de nitrógeno y otras dos tuberías de oxígeno, pero no durante todo el recorrido (se especifica la distribución en el apartado 6.4.2.-) compartiendo suportación y apoyos, todas para servicio de la Planta de Gijón II y III de Praxair.

El plano de situación de GIII se puede ver en el documento “Planos”, el cual es el plano n^o2 y se denomina: SIT-000-GIJÓN.

2.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El principal consumidor de la planta de Gijón es ArcelorMittal Gijón, la cual requiere el suministro de grandes cantidades de oxígeno y nitrógeno para su utilización en los hornos.

Actualmente precisa de un caudal de nitrógeno de unos 15.000 Nm³/h de media al año. Para dicho caudal, el principal compresor utilizado es el BLNC#1 de Gijón III, el cual es el que presenta un mejor rendimiento y eficiencia energética y suministra unos 11.500 Nm³/h



de media y trabajando a unos 1630 kW de media al año, apoyándose para suministrar el resto de caudal demandado con los otros dos compresores existentes.

Debido a la creciente demanda por parte del cliente anteriormente mencionado y con motivo del nuevo contrato establecido entre ambas entidades, cliente y Praxair, en un futuro muy próximo dicho caudal deberá aumentar considerablemente, en torno a unos 22.000 Nm³/h o más, llegando a tal punto que precisará que la mayor parte del tiempo los compresores BLNC#2 de Gijón III y el BLNC de Gijón II suministren el máximo de su capacidad, por tanto, el motor del BLNC#2 precise de una potencia casi constante de 600 kW y el motor del BLNC precise de una potencia también constante de 1000 kW. Trabajando en estas condiciones, ambos compresores estarán sometidos a un sobreesfuerzo energético constante y como se sabe de los dos apartados anteriores: 2.1.1.- y 2.1.2.-, el motor que utilizan tiene mayor potencia de la que precisan, por eso su rendimiento energético es muy bajo. Incluso puede darse el caso de que en algún momento la demanda de nitrógeno sea superior a la que los tres compresores pueden suministrar, lo que conlleva a la gasificación de las reservas de nitrógeno almacenadas, dando lugar a un mayor coste para la empresa.

2.3.- SOLUCIÓN ADOPTADA

A raíz del problema visto en el apartado anterior, la mejor y única solución consiste en la ampliación del sistema de compresión en Gijón III con la sustitución del BLNC#2, dejando éste como reserva para un proyecto futuro con los tres compresores en paralelo, por un compresor centrífugo de una capacidad y características parecidas al BLNC#1 para que pueda trabajar en las mismas condiciones y así cumplir la demanda de una forma eficiente, sin sobreesfuerzo energético y por tanto, que se produzca una mejora en las prestaciones y en la eficiencia energética.

El objetivo con esta solución consiste en conseguir una mejora en eficiencia energética mediante un menor o igual uso de potencia únicamente con el nuevo motor del BLNC#2 que con el uso combinado de los dos motores de los BLNC#2 y el BLNC a pleno rendimiento. Gracias a esta mejora en eficiencia energética se consigue un considerable menor consumo en energía, por tanto, supondría a la par un ahorro económico para la empresa, siendo lo que determina la mejora en eficiencia energética es el consumo energético unitario por Nm³ o por kg de nitrógeno impulsado por el nuevo compresor.

Con el motivo de esta mejora en eficiencia energética se pretende conseguir una subvención para el proyecto de instalación del nuevo compresor, alegando dicha mejora y los beneficios que el menor consumo de energía final supondría, menor uso de energía primaria final, menor uso de energía primaria no renovable y menores emisiones de CO₂. Esto se demuestra en el apartado 3.5.2.-



2.3.1.- Compresor seleccionado

Para la selección del compresor se le facilitó a diferentes proveedores de compresores centrífugos las características a las que debería trabajar el compresor, basándonos en las características del BLNC#1.

Las características facilitadas fueron las siguientes:

- Caudal → aprox. 12.000 Nm³/h
- Presión descarga → 16-18 barg
- Temperatura descarga → aprox. 30°C
- Potencia motor → aprox. 1,85 MW

Con estas características cada proveedor selecciona uno de sus compresores en caso de que cumpla con lo requerido y en el caso opuesto se vería obligado a diseñar y crear uno nuevo de forma específica según las especificaciones facilitadas. Al finalizar este proceso envían a nuestra empresa una oferta con el precio y las prestaciones que nos ofrecen.

Las ofertas recibidas son estudiadas y comparadas unas con otras, finalmente la junta decide cuál de ellas es la mejor o la que más nos conviene. Una vez decidido se envía una oferta en firme al proveedor del compresor seleccionado.

El compresor que finalmente se eligió pertenece a la empresa Ingersoll Rand y se trata de un compresor centrífugo de cuatro etapas con un motor de una potencia de 2 MW que impulsa un caudal de 13.000 Nm³/h, el cuál pasará a llamarse en el futuro: BLNC#2.

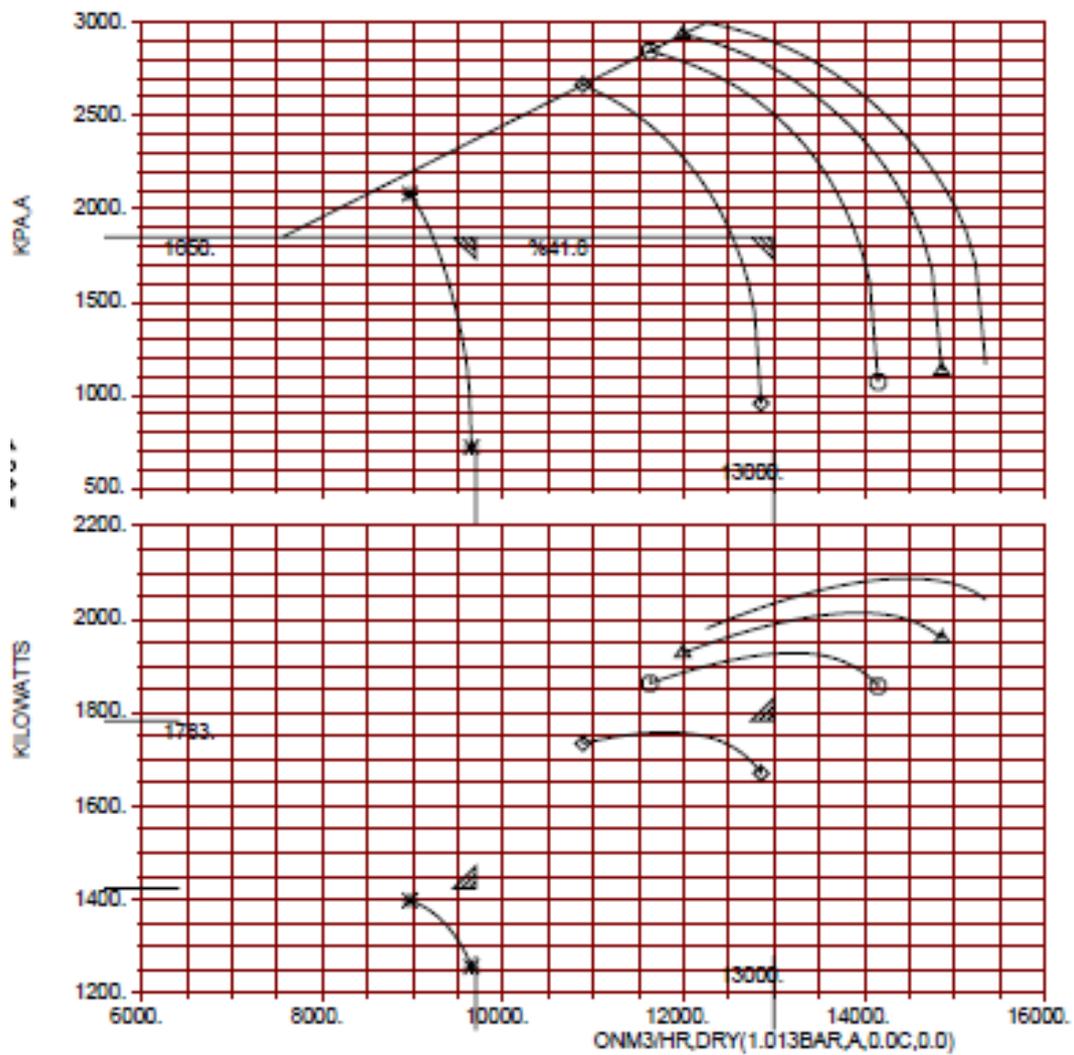


Figura 2.2.- Curvas de funcionamiento del nuevo compresor



3.- ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para poder realizar un estudio de la eficiencia energética producida por los tres compresores que hay actualmente es preciso conocer los datos de funcionamiento de cada compresor. Para ello disponemos de los datos de la potencia empleada, las horas en funcionamiento, el caudal volumétrico impulsado y la presión de descarga durante el año 2017 de cada compresor. Se realizará de la forma más aproximada posible un estudio sobre el consumo energético producido por los tres compresores actuales durante el año 2017. Mediante este estudio se realizará una comparación con el supuesto consumo energético que tendría el nuevo compresor teniendo que suministrar el caudal correspondiente de los dos compresores que apoyan al BLNC#1 si el nuevo compresor ya hubiera estado instalado durante el año mencionado y finalmente la mejora en eficiencia energética que se hubiera producido. Con la comparativa se demostrará el beneficio que se hubiera generado en dicho año y que a su vez se generará una vez instalado en el futuro debido a la mayor demanda, lo que justifica la instalación de un nuevo compresor, y por último el ahorro que se generaría directamente sobre la energía primaria total, la energía primaria no renovable y las emisiones de CO₂.

3.1.- DATOS COMPRESORES EN 2017

Los datos con los que se trabajó fueron las medias a lo largo del año 2017 para cada compresor que hay actualmente. Estos datos fueron aportados por Praxair, que son:

| | Caudal impulsado Q _v (Nm ³ /h) | Potencia P (kW) | Presión Descarga P _s (barg) | Horas en funcionamiento h (h/año) |
|----------|---|--------------------|---|--------------------------------------|
| BLNC#1 | 11.216,16 | 1.628,5 | 16,45 | 8.760 |
| BLNC#2 | 1.656,89 | 550,17 | 16,45 | 4.552 |
| BLNC-GII | 5.097,40 | 812,76 | 16,2 | 4.792 |

Tabla 3.1.- Datos iniciales funcionamiento compresores actuales

El caudal impulsado Q_v por cada compresor está medido en condiciones normales, las cuales son a 1,013 barg de presión y 273K de temperatura.

La densidad del N₂ para las condiciones normales es de:

$$\rho_{N_2} = \frac{P \text{ (Pa)} \cdot Mm \left(\frac{kg}{kmol} \right)}{T \text{ (K)} \cdot R \left(\frac{kJ}{kmolK} \right)} = \frac{101325 \cdot 28}{273,15 \cdot 8,314 \cdot \frac{1000 J}{1 kJ}} = 1,2507 \frac{kg}{Nm^3} \quad (3.1)$$

Una vez conocemos la densidad del nitrógeno en condiciones normales (ecuación (3.1), se calcula el caudal másico suministrado (ecuación (3.2) por cada compresor durante 2017.



$$m = Q_V \cdot \rho_{N_2} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (3.2)$$

El caudal másico será de:

| | Caudal másico impulsado m (kg/h) |
|-----------------|----------------------------------|
| BLNC#1 | 14.028,05 |
| BLNC#2 | 2.072,27 |
| BLNC-GII | 6.375,32 |

Tabla 3.2.-Caudal másico impulsado por cada compresor en 2017

3.1.1.- Cantidad N₂ suministrada en 2017

Es preciso conocer la cantidad total de nitrógeno a media presión suministrada al cliente a lo largo de 2017 para realizar el estudio energético.

Para obtener la cantidad total suministrada por cada compresor se multiplica el caudal másico de cada uno (Tabla 3.2) por las horas en funcionamiento en 2017 de la Tabla 3.1 y se obtiene la cantidad total de nitrógeno que suministró en un año cada compresor (ecuación (3.3))

$$C = m \cdot h \left[\frac{kg}{año} \right] \quad (3.3)$$

| | Cantidad Total suministrada C (kg/año) |
|-----------------|--|
| BLNC#1 | 122,89x10 ⁶ |
| BLNC#2 | 9,43 x10 ⁶ |
| BLNC-GII | 30,55x10 ⁶ |

Tabla 3.3.-Cantidad total de N₂ suministrada por cada compresor en 2017

Con la suma de los datos de la segunda columna de la Tabla 3.3 obtenemos la cantidad total de nitrógeno suministrada por los tres compresores en 2017:

$$\text{Cantidad total suministrada por los 3 compresores} \rightarrow 162,87 \cdot 10^6 \frac{kg}{año}$$

Pero para realizar la comparativa se mantiene el mismo caudal y cantidad impulsada por el BLNC#1, pues seguiría trabajando en las mismas condiciones, haciéndose cargo el nuevo compresor del caudal y cantidad impulsada por la combinación del BLNC#2 y el BLNC (ecuación (3.4))

$$\text{Cantidad total suministrada por el BLNC\#1} \rightarrow 122,89 \cdot 10^6 \frac{kg}{año}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad total suministrada por la combinación del BLNC\#2 + BLNC} \\ - \text{GII} \rightarrow 9,43 \cdot 10^6 + 30,55 \cdot 10^6 = 39,98 \cdot 10^6 \frac{kg}{año} \end{aligned} \quad (3.4)$$



3.2.- CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para obtener la eficiencia energética de cada compresor se tiene que calcular el consumo energético unitario por kg de N₂ (η_M). A menor consumo energético unitario, mayor y mejor eficiencia energética, que para calcularlo se emplean la siguiente ecuación:

$$\eta_M = \frac{P}{m} \left[\frac{kWh}{kg} \right] \quad (3.5)$$

Para calcular el consumo energético unitario que presentan los compresores actuales por kg de nitrógeno impulsado (ecuación (3.5) hay que dividir la potencia empleada (Tabla 3.1) por cada compresor entre el caudal másico suministrado (Tabla 3.2) durante el año 2017. Obtenemos los siguientes resultados para cada compresor:

| | Eficiencia Energética η_M(kWh/kg) |
|-----------------|--|
| BLNC#1 | 0,145 |
| BLNC#2 | 0,265 |
| BLNC-GII | 0,127 |

Tabla 3.4.-Eficiencia energética compresores actuales

Como se puede observar en la Tabla 3.4 el BLNC#1 y el BLNC de GII presentan unas muy buenas eficiencias energéticas, pero en el caso del BLNC#2 la eficiencia energética presenta un consumo unitario pésimo en comparación.

3.2.1.- Mejora de la eficiencia energética

Dado que el principal objetivo es demostrar la mejora energética que supone la instalación de un nuevo compresor que cubrirá las funciones realizadas por dos de los actuales (BLNC#2 y BLNC-GII) debido al inminente crecimiento en la demanda, la mejor forma de demostrarlo se basa en comparar el coste que supone suministrar la cantidad total impulsada por cada compresor, que aparece reflejada en la Tabla 3.3 durante el año 2017 pero esta vez usando los compresores BLNC#2 y BLNC a pleno rendimiento, lo que significa que trabajen a plena capacidad, pues esto mismo sucederá en cuanto el caudal a suministrar sea igual, aproximado o mayor a los 22.000 Nm³/h que actualmente es el límite impulsado, lo que requerirá un caudal entre ambos compresores de unos 11.000 Nm³/h.

3.2.1.1.- Eficiencia compresores actuales: BLNC#2 y BLNC-GII

Los datos a plena capacidad de ambos compresores según los datos registrados por Praxair son:



| | Potencia P (kW) | Caudal impulsado Q_v (Nm ³ /h) | Caudal másico impulsado m (kg/h) |
|----------|-----------------|---|----------------------------------|
| BLNC#2 | 600 | 4.000 | 5.002,8 |
| BLNC-GII | 1.000 | 7.000 | 8.754,9 |

Tabla 3.5.-Datos funcionamiento BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad

Finalmente, para calcular la eficiencia energética de cada compresor para estas condiciones se calcula el consumo de cada uno al igual que en la ecuación (3.5); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con los datos de la Tabla 3.5.

| | Eficiencia Energética η_M (kWh/kg) |
|----------|---|
| BLNC#2 | 0,112 |
| BLNC-GII | 0,114 |

Tabla 3.6.- Eficiencia energética BLNC#2 y BLNC a plena capacidad

Como se puede observar cuanto mayor es el caudal impulsado, mejor es la eficiencia energética producida, mejorando las eficiencias que presentaban en la Tabla 3.4 y finalmente al ser menor el consumo energético unitario por kg de nitrógeno impulsado, menor es la energía consumida por los compresores.

3.2.1.2.- Eficiencia Nuevo compresor

De la misma forma que en el apartado 3.2.1.1.-, se calcula el consumo energético unitario para el nuevo compresor, que, según los test de funcionamiento y las curvas de funcionamiento aportados por el proveedor del compresor, Ingersoll Rand, para el caudal volumétrico en condiciones normales de 11.000 Nm³/h y una presión de descarga de 16,45 barg (la misma que presenta el BLNC#2), los datos de potencia y caudal son los siguientes:

| | Potencia P (kW) | Caudal impulsado Q_v (Nm ³ /h) | Caudal másico impulsado m (kg/h) |
|--------------|-----------------|---|----------------------------------|
| Nuevo BLNC#2 | 1.545 | 11.000 | 13.757,7 |

Tabla 3.7.-Datos funcionamiento Nuevo Compresor para 11.000 Nm³/h

Finalmente, para calcular la eficiencia energética del nuevo compresor para estas condiciones se calcula el consumo al igual que en la ecuación (3.5) con los datos de la Tabla 3.7.

| | Eficiencia Energética η_M (c€/kg) |
|--------------|--|
| Nuevo BLNC#2 | 0,112 |

Tabla 3.8.-Eficiencia energética Nuevo Compresor para 11.000 Nm³/h

Como ya se comentó previamente, cuanto mayor caudal menor consumo energético (mejor eficiencia energética) debido a la relación caudal-potencia, de los cuales también disponemos datos para el nuevo compresor para otros caudales (12.000 y 13.000 Nm³/h) que es capaz de suministrar, que, según otros test, las curvas de funcionamiento y los cálculos



realizados en este punto, se tienen los siguientes datos de funcionamiento, energía consumida y eficiencia energética:

| Caudal impulsado Q_v (Nm ³ /h) | Potencia P (kW) | Eficiencia Energética η_M (kWh/kg) |
|---|-----------------|---|
| 12.000 | 1.670 | 0,111 |

Tabla 3.9.- Datos funcionamiento, energía consumida y eficiencia energética Nuevo Compresor para 12.000 Nm³/h

| Caudal impulsado Q_v (Nm ³ /h) | Potencia P (kW) | Eficiencia Energética η_M (kWh/kg) |
|---|-----------------|---|
| 13.000 | 1.725 | 0,106 |

Tabla 3.10.- Datos funcionamiento, energía consumida y eficiencia energética Nuevo Compresor para 13.000 Nm³/h

Con estos resultados queda demostrada la mejora en eficiencia energética que se produce con la instalación de un nuevo compresor. De igual forma genera un menor consumo energético, es decir, un ahorro energético cada año, que se transforma en un ahorro económico para la empresa Praxair. Debido a esta menor energía consumida, se consume menor energía final, lo que genera un ahorro en energía primaria total, energía primaria no renovable y en las emisiones de CO₂.

Queda finalmente reflejado que la instalación y sustitución de un compresor por otro nuevo de mayor capacidad, resulta un Proyecto necesario.

3.3.- ENERGÍA CONSUMIDA 2017

Es preciso conocer la energía consumida total por cada compresor a lo largo de 2017 para realizar el análisis energético y comprobar si se produce un ahorro suficiente para que sea eficaz la sustitución e instalación del nuevo compresor.

La energía consumida por cada compresor se calcula multiplicando la cantidad de nitrógeno suministrada por cada compresor (Tabla 3.3) por el consumo energético unitario por kg de cada uno.

$$E = \eta_M \cdot C \left[\frac{kWh}{\text{año}} \right] \quad (3.6)$$

3.3.1.- Energía consumida por compresores actuales a plena capacidad: BLNC#2 y BLNC-GII

Para calcular la energía consumida (ecuación (3.6) a plena capacidad por el BLNC#2 y el BLNC-GII se multiplica la cantidad total suministrada de cada compresor (Tabla 3.3) por las eficiencias energéticas de la Tabla 3.6. Dicho valores son:



| | Energía Consumida E (kWh/año) |
|-----------------|-------------------------------|
| BLNC#2 | 1,13x10 ⁶ |
| BLNC-GII | 3,49x10 ⁶ |

Tabla 3.11.- Energía consumida BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad

El total de la energía consumida por ambos compresores es la suma de las energías de la tabla Tabla 3.11.

Energía consumida por BLNC#2 + BLNC – GII a plena capacidad

$$\rightarrow 4,62 \times 10^6 \frac{kWh}{año} \quad (3.7)$$

3.3.2.- Energía que consumiría el Nuevo compresor

Para calcular la energía que consumiría (ecuación (3.6) el nuevo compresor para el caudal de 11.000 Nm³/h para realizar la comparación de energía consumida se multiplica la cantidad total suministrada por el BLNC#2 y el BLNC-GII de forma combinada (ecuación (3.4) por la eficiencia energética de la Tabla 3.8. Dicho valor es:

| | Energía Consumida E (kWh/año) |
|---------------------|-------------------------------|
| Nuevo BLNC#2 | 4,49 x10 ⁶ |

Tabla 3.12.-Energía consumida Nuevo Compresor para 11.000 Nm³/h

3.4.- COSTE ENERGÍA

El coste de la energía por kWh está reflejado en la última publicación del CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) publican mensualmente unos boletines que resumen la situación del mercado eléctrico con datos medios para cada uno de los niveles de tensión; el último informe publicado es de abril.

La planta de Praxair se trata de un consumidor de Alta Tensión tipo 3 ($\geq 72,5$ KV y < 145 KV).

Según los diferentes componentes que forman el precio de la energía que se pueden ver en la Figura 3.1. Se usará el valor obtenido durante los últimos doce meses: noviembre 2016- octubre 2017, el cual es:

$$7,24 \frac{c\text{€}}{kWh}$$



BOLETÍN DE INDICADORES ELÉCTRICOS

8. Facturación estimada por el suministro de electricidad del consumidor medio

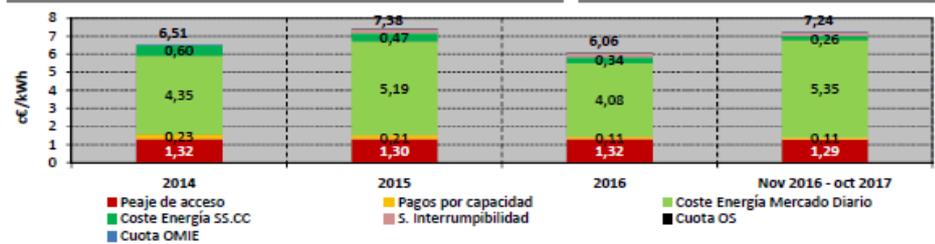
Consumidores de AT 3 (≥ 72,5 kV y < 145 kV) (6.3)

en los últimos cuatro meses

| Componente | c€/kWh | | | | Tasa de variación sobre el mismo mes del año anterior | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------|------------------|------------------|
| | jul.-17 | ago.-17 | sep.-17 | oct.-17 | jul 17 s/ jul 16 | ago 17 s/ ago 16 | sep 17 s/ sep 16 | oct 17 s/ oct 16 |
| Peaje de acceso | 1,61 | 0,96 | 1,15 | 1,04 | -1% | -4% | -4% | -1% |
| Pagos por capacidad | 0,20 | | 0,08 | 0,07 | 2% | | -2% | 7% |
| Coste de la energía | 5,39 | 5,37 | 5,52 | 6,37 | 18% | 14% | 12% | 7% |
| Mercado Diario | 5,01 | 4,90 | 5,06 | 5,86 | 20% | 15% | 13% | 8% |
| SS.CC | 0,18 | 0,26 | 0,23 | 0,29 | -22% | 5% | -9% | -8% |
| S. Interrumpibilidad | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,22 | 7% | 6% | 11% | 6% |
| Cuota OS | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Cuota OMIE | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Total | 7,22 | 6,34 | 6,76 | 7,49 | 12% | 11% | 8% | 6% |

en los últimos cuatro años

| Componente | c€/kWh | | | | Tasa de variación sobre el año anterior | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------------|---|--------------|--------------|---|
| | 2014 | 2015 | 2016 | Últimos 12 meses. Nov 2016 - oct 2017 | 2014 s/ 2013 | 2015 s/ 2014 | 2016 s/ 2015 | Últimos 12 meses. Nov 2016 - oct 2017 s/ 2016 |
| Peaje de acceso | 1,32 | 1,30 | 1,32 | 1,29 | -1% | -1% | 1% | -2% |
| Pagos por capacidad | 0,23 | 0,21 | 0,11 | 0,11 | 7% | -10% | -48% | 2% |
| Coste de la energía | 4,95 | 5,86 | 4,62 | 5,83 | -2% | 18% | -21% | 26% |
| Mercado Diario | 4,35 | 5,19 | 4,08 | 5,35 | -2% | 19% | -21% | 31% |
| SS.CC | 0,60 | 0,47 | 0,34 | 0,26 | 2% | -21% | -28% | -23% |
| S. Interrumpibilidad | | 0,20 | 0,20 | 0,21 | | | 2% | 6% |
| Cuota OS | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 50% | 3% | 0% | 0% |
| Cuota OMIE | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 2% | 0% | 0% | 0% |
| Total | 6,51 | 7,38 | 6,06 | 7,24 | -1% | 13% | -18% | 20% |



Fuente: CNMC (SINCRO, liquidación 2 de 2018), OMEL y REE.
Nota: No incluye impuestos, ni margen de comercialización

Figura 3.1.-Componentes y precio de la electricidad

Para dicho valor falta aplicarle los siguientes impuestos:

- Impuesto municipal → 1,5 %
- Impuesto eléctrico → 5,1127 %
- IVA → 21 %

Aplicando los impuestos, quedaría un valor final de coste de la energía de:

$$Precio\ energía\ c_E = 7,24 \cdot 1,015 \cdot 1,051127 \cdot 1,21 = 9,34 \frac{c\text{€}}{kWh} \quad (3.8)$$



3.5.- AHORRO DE ENERGÍA EN 2017

Gracias al estudio sobre la eficiencia energética se obtuvo que el nuevo compresor presenta una mejor eficiencia energética. Debido a la instalación del nuevo compresor se produciría un considerable menor consumo de energía, que da lugar a un ahorro energético y económico. El ahorro se realiza mediante la comparación de la acción combinada del BLNC#2 y el BLNC-GII con el nuevo compresor a instalar, todos los datos con los que se trabaja son para cuando el caudal es de 11.000 Nm³/h en el año 2017.

La energía consumida para realizar la comparación es la suma de las energías consumidas por el BLNC#2 y el BLNC-GII (ecuación (3.7) y la energía que consumiría el nuevo compresor para suministrar la misma cantidad de nitrógeno (Tabla 3.12), que son:

| | Energía Consumida E (kWh/año) |
|------------------------|-------------------------------|
| BLNC#2+BLNC-GII | 4,62 x10 ⁶ |
| Nuevo BLNC#2 | 4,49 x10 ⁶ |

Tabla 3.13.- Comparación Energía consumida para 11.000 Nm³/h

El ahorro de energía producida sería la diferencia de ambos datos de la Tabla 3.13:

$$\text{Ahorro energía} = 4,62 \cdot 10^6 - 4,49 \cdot 10^6 = 130.681 \frac{\text{KWh}}{\text{año}} \quad (3.9)$$

El ahorro de energía produce un ahorro económico a la par que se calcula multiplicando el valor de la ecuación (3.9) por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$\text{Ahorro económico} = 1,31 \cdot 10^6 \cdot 9,34 = 12.214 \text{ €} \quad (3.10)$$

3.5.1.- Otros posibles ahorros producidos en 2017

De igual forma se realizan los cálculos que en el apartado anterior (3.5.-) pero esta vez si el caudal impulsado por el nuevo compresor fuera mayor (12.000 y 13.000 Nm³/h), siendo la energía consumida para dichos caudales y misma presión de descarga que el actual BLNC#2 (16,45 barg):

| Caudal impulsado (Nm ³ /h) | Energía Consumida (kWh/año) |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 12.000 | 4,45x10 ⁶ |
| 13.000 | 4,24x10 ⁶ |

Tabla 3.14.-Energía consumida Nuevo BLNC#2 para 12.000 Nm³/h y 13.000 Nm³/h

El ahorro energético y económico igual que en el apartado anterior (3.5.-3.5.-), se calcula mediante la diferencia de energía consumida con la consumida del apartado 3.3.1.- (Combinación del BLNC#2+BLNC-GII):



| Caudal impulsado (Nm ³ /h) | Ahorro Energía (kWh/año) | Ahorro Coste Total (€) |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 12.000 | 171.853 | 16.062€ |
| 13.000 | 378.831 | 38.132 € |

Tabla 3.15.- Ahorro energético y económico Nuevo BLNC#2 para 12.000 Nm³/h y 13.000 Nm³/h

3.5.2.- Reducción de energías primarias y emisiones en 2017

Gracias al menor consumo energético se obtiene otro beneficio que también es muy importante de cara al medio ambiente, que es el ahorro que se produce en la energía primaria total, la energía primaria no renovable y las emisiones de CO₂ debido al menor consumo de Energía Final.

Los coeficientes de paso de la energía final son:

| Energético | a Energía Primaria Total (kWhEP/kWhEF) | a Energía Primaria No Renovable (kWhEPNR/kWhEF) | a Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /kWhEF) |
|--------------------------------|--|---|---|
| Electricidad | 2.368 | 1.954 | 0.331 |
| Gasoleo calefaccion / Fuel-oil | 1.182 | 1.179 | 0.311 |
| GLP | 1.204 | 1.201 | 0.254 |
| Gas Natural | 1.195 | 1.190 | 0.252 |
| Carbon | 1.084 | 1.082 | 0.472 |
| Biomasa no densificada | 1.037 | 0.034 | 0.018 |
| Biomasa densificada (pelets) | 1.113 | 0.085 | 0.018 |

Figura 3.2.- Factores de paso de Energía Final

Como se trata de electricidad, utilizaremos los coeficientes de la primera fila de la Figura 3.2.

El ahorro producido se calcula multiplicando el ahorro en energía consumida de la ecuación (3.9) y de la Tabla 3.15 por cada factor, calcularemos el ahorro para cada caudal impulsado por el nuevo compresor, siendo el resultado:

| Caudal impulsado (Nm ³ /h) | Ahorro Energía Primaria (kWhEP/año) | Ahorro Energía Primaria No Renovable (kWhENP/año) | Ahorro Emisiones CO ₂ (kgCO ₂ /año) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 11.000 | 309.453 | 255.351 | 43.255 |
| 12.000 | 406.948 | 335.801 | 56.883 |



| | | | |
|---------------|---------|---------|---------|
| 13.000 | 897.074 | 740.237 | 125.393 |
|---------------|---------|---------|---------|

Tabla 3.16.-Ahorro en energía final

Como se puede observar el beneficio producido es muy grande para el medio ambiente.

Por lo tanto, queda más que demostrado la necesidad de instalar y utilizar un nuevo compresor.



4.- INSTALACIÓN COMPRESOR

NUEVO

4.1.- SITUACIÓN INICIAL

El nitrógeno producido por la columna en Gijón III se encuentra a baja presión (1 barg o menos) y es conducido por una tubería de 18” denominada: 18”-NG1-CS150B desde la descarga de la columna hasta la aspiración de ambos compresores. En el tramo de aspiración de ambos compresores encontramos dos bifurcaciones, ambas en el tramo que conduce hacia el BLNC#2 siendo la primera la que conduce parte de ese nitrógeno a baja presión a la “Soplante de Nitrógeno” y la segunda que puede ser To/From, conduce o recibe nitrógeno a baja presión de la planta de Gijón II. Esto puede verse representado en el plano nº3 “SIT INI LP” (plano que representa isométricamente el sistema de tuberías en el tramo de aspiración de los compresores), que se encuentra en el documento “Planos”.

El plano nº4 “SIT INI HP”, representa isométricamente el sistema de tuberías en el tramo de descarga de los compresores se encuentra en el documento “Planos”.

El plano nº5 “SIT INI HP+LP”, representa isométricamente el sistema de tuberías, tanto aspiración como descarga, conjuntamente en la zona de los compresores se encuentra en el documento “Planos”.

4.2.- ANÁLISIS DE SOLUCIONES

Teniendo en cuenta la situación descrita en los puntos anteriores y dado que el objetivo un mayor caudal de nitrógeno en las mismas condiciones de presión y temperatura, la única solución racional posible pasa por hacer una modificación en la línea 18”-NG1-CS150B, para permitir la conexión del nuevo segundo compresor, el cual tomará la denominación de BLNC#2, que sustituirá al anterior compresor de menor capacidad también llamado BLNC#2 y a su vez independizar las conexiones con la Soplante de Nitrógeno y con Gijón II de los compresores BLNC#1 y BLNC#2, y de esta forma mejorar el aislamiento de los diferentes equipos y facilitar su mantenimiento en la Planta de Gijón III, y por último, minimizar las pérdidas de carga que puedan generarse mediante el desdoblamiento de la línea 8”-NG2A-CS300A en la parte del recorrido que sea posible para contar con dos nitroductos que conduzcan el caudal de nitrógeno a media presión desde la descarga de ambos BLNC’s hasta el medidor M9. Para ello será necesario realizar las siguientes modificaciones:

- Intercalar una T en la tubería 18”-NG1-CS150B a la misma altura, pero por encima de la T que conecta con el BLNC#1 y el nuevo BLNC#2 (misma conexión que el antiguo BLNC#2) sustituyendo a un codo, para conducir la producción de nitrógeno a la aspiración de ambos compresores. Pero al ser ésta una tubería con presión de



diseño inferior a 1,027 barg (presión de trabajo inferior a 0,5 barg para BLNC#1 y 0,15 barg para BLNC#2) sin exigencias reglamentarias según R.D. 769/1999 y R.D. 2060/2008, se realizará en las mismas condiciones técnicas y de seguridad que las demás, si bien no será necesaria su justificación.

- El plano nº6 “NG1-000” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.
- Conectar una T en la tubería 18”-NG1-CS150B justo aguas abajo de la T mencionada en el punto anterior para también conducir la producción de nitrógeno directamente por un lado con la Soplante de Nitrógeno y por el otro con Gijón II. Pero al ser ésta una tubería con presión de diseño inferior a 1,027 barg (presión de trabajo inferior a 0,4 barg para la conexión con la Soplante y 0,5 barg para la conexión con Gijón II) sin exigencias reglamentarias según R.D. 769/1999 y R.D. 2060/2008, se realizará en las mismas condiciones técnicas y de seguridad que las demás, si bien no será necesaria su justificación.
 - El plano nº7 “NG1-001” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.
- Unir mediante un codo y un pequeño tramo de tubería el tramo recto de la tubería 12”-NG1A-CS150B conectada con la Soplante de nitrógeno y a su vez con la T mencionada en el punto anterior. Pero al ser ésta una tubería con presión de diseño inferior a 1 barg (presión de trabajo inferior a 0,4 barg) sin exigencias reglamentarias según R.D. 769/1999 y R.D. 2060/2008, se realizará en las mismas condiciones técnicas y de seguridad que las demás, si bien no será necesaria su justificación.
 - El plano nº8 “NG1A-000” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.
- Unir mediante un codo y un pequeño tramo de tubería el tramo recto de la tubería 10”-NG2A-CS150B conectada Gijón II con la te como se indica en el punto anterior. Pero al ser ésta una tubería con presión de diseño inferior a 0,9 barg (presión de trabajo inferior a 0,5 barg) sin exigencias reglamentarias según R.D. 769/1999 y R.D. 2060/2008, se realizará en las mismas condiciones técnicas y de seguridad que las demás, si bien no será necesaria su justificación.
 - El plano nº9 “NG1A-001” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.

En el caso de instalar el nuevo nitroducto, las modificaciones a realizar serían:

- Intercalar un carrete embridado con dos bridas, cada una en un extremo, en el tramo recto de la tubería 8”-NG2-CS300A justo encima del nuevo BLNC#2, para continuar la conducción de nitrógeno por el segundo nitroducto hasta el medidor M9 y también conectarse con la descarga del BLNC#1.



- El plano nº15 “NG2A-002” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.
- Intercalar una te en el by-pass del M9 en la tubería 8”-NG3-CS300A entre la conexión de las válvulas X701N, X7102N y B7100N para conectar el segundo nitroducto.
 - El plano nº17 “NG2A-004” representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento “Planos”.

4.3.- PLANIFICACIÓN DE SUSTITUCIÓN

La instalación del compresor y sus conexiones debe comenzarse con la planta parada, ya que, si estuviese operativa, no se podría realizar la modificación del plano nº5, 6, 7, 8 y 9, pues no habrá forma de desviar la conducción de nitrógeno para su compresión en el BNLC#1 y posterior suministro a los clientes. Es por esto que es necesario realizar las modificaciones durante una parada de la planta por mantenimiento debido a que realizarlas llevará toda una jornada laboral. Para dicha parada, se realizará toda la programación pertinente para la realización de las modificaciones, pues requerirá el cierre de válvulas de elementos auxiliares.

Una vez realizadas las modificaciones anteriormente mencionadas, se habrán independizado todos los equipos, así como el suministro. Gracias a esto, la sustitución del compresor e instalación de sus elementos auxiliares pueden realizarse sin la parada de la planta y por tanto del suministro.

El nuevo compresor se situará justo al lado del actual BLNC#1 sobre la cimentación y zapatas existentes que actualmente sostienen al viejo BLNC#2. Gracias a esto, la instalación del compresor no requerirá de obra civil, la única tarea que requerirá será anclarlo en la cimentación. La plataforma sobre la cual se situará se puede ver en los planos nº3 “SIT INI LP”, nº4 “SIT INI HP” y nº5 “SIT INI HP+LP” del documento “Planos”.

De cara a que la cimentación va a soportar un compresor de mayor tamaño y peso, hay que realizar el cálculo de resistencia del suelo, la cual se considera de $0,5 \text{ kg/cm}^2$. Los cálculos pueden verse en el apartado 1.1. del documento “Anexos”, siendo la zapata estable estáticamente.

La orientación del compresor será la misma que el compresor a sustituir, teniendo la aspiración orientada hacia la tubería 18”-NG1-CS150B que conduce el nitrógeno gas producto de la columna. Para el caso de la descarga estará orientada para la dirección opuesta a la actual.

El compresor se encuentra rodeado de paneles que evitan la acción del viento y que el intenso ruido que se produce sea desagradable. Gracias a los paneles no es necesario calcular el cálculo de vuelco.



4.3.1.- Diagrama de Gant

El inicio y desarrollo posterior del proyecto están supeditados a la obtención de las licencias, autorizaciones administrativas pertinentes y requisitos de producción o demanda de las instalaciones a reformar, por lo que las fechas previstas pueden sufrir ligeras modificaciones.

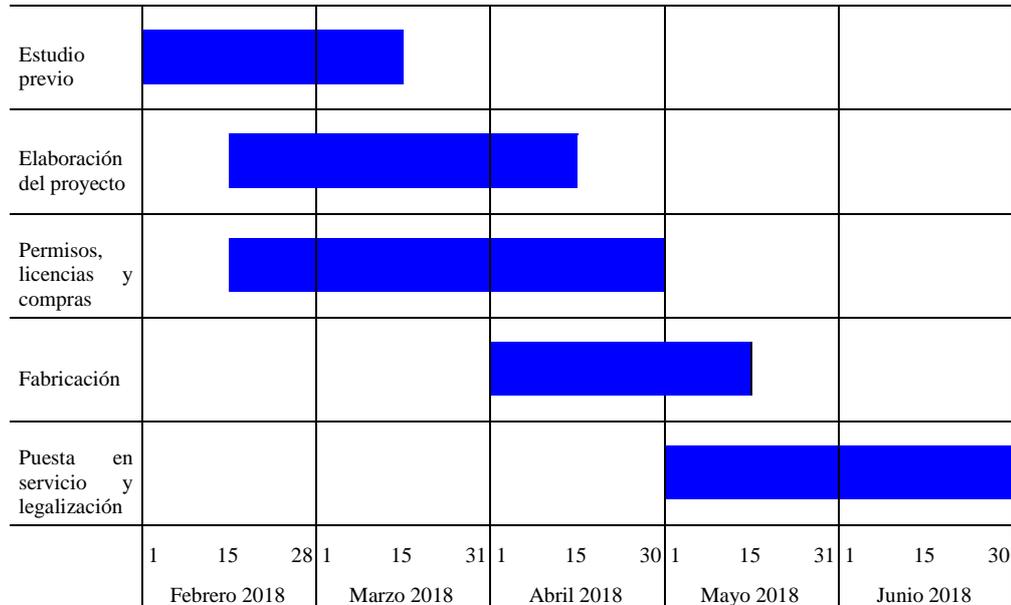


Figura 4.1.-Planificación instalación nuevo compresor (Gant)

4.4.- MODIFICACIÓN DE EQUIPOS A PRESIÓN

Se denominan equipos a presión aquellos equipos que transportan cualquier tipo de fluido cuya presión de diseño (PS) sea igual o superior a 0,5 barg según el R.D. 2060/2008. Los equipos aparecen con su categorización según la directiva europea de equipos a presión 97/23/CE.

Se procede a exponer de forma pormenorizada la modificación proyectada.

4.4.1.- Modificación N°1: Carrete embridado en 8"-NG2-CS300A (Primer Nitroducto) para conexión de 8"-NG2A-CS300A (Segundo Nitroducto)

En la tubería 8"-NG2-CS300A, en la zona situada encima del BLNC#2 que se conecta con la impulsión de este, se intercalará un carrete embridado estándar de 8"x8"x8" de acero SA 234 WPB Gr. B, con el tramo de tubería de 8" STD de acero SA 106 Gr. B Sch. STD ya existente que se conectaba previamente con la impulsión del BLNC#2. Ya que el tramo que se añade es muy pequeño, la tubería modificada con este ramal mantiene el nombre original.



| Elemento mod. | Fluido grupo | Diámetro | Presión PS | Categoría |
|---------------|--------------|----------|------------|-----------|
| 8"-NG2-CS300A | 2 | DN 200 | 25 barg | II |

El plano nº15 "NG2A-002" representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento "Planos".

4.4.2.- Modificación N°2: T conexión línea 8"-NG2A-CS300A con 8"-NG3-CS300A en zona del M9

En la tubería 8"-NG3-CS300A, en la zona correspondiente al medidor M9, se intercalará una T estándar de 8"x8"x8" de acero SA 234 WPB Gr. B, justo en el By-Pass antes de la válvula B7100N, para conectar la descarga del nuevo compresor BLNC#2 a esa línea. Ya que el tramo que se añade es muy pequeño, la tubería modificada con este ramal mantiene el nombre original.

| Elemento mod. | Fluido grupo | Diámetro | Presión PS | Categoría |
|---------------|--------------|----------|------------|-----------|
| 8"-NG3-CS300A | 2 | DN 200 | 25 barg | II |

El plano nº17 "NG2A-004" representa isométricamente dicha modificación y se encuentra en el documento "Planos".

4.5.- EQUIPOS DE NUEVA INSTALACIÓN

4.5.1.- Compresor de nitrógeno BLNC#2

La instalación del nuevo compresor incluye la ejecución de los siguientes pasos:

- Cimentación y obra civil.
- Alimentación eléctrica.
- Suministro de agua para enfriamiento.
- Montaje del compresor y su motor.
- Conexión con línea de aspiración desde red general de nitrógeno a baja presión, en la tubería 18"-NG1A-CS150B.
- Línea de gas comprimido desde la descarga de la máquina hasta la tubería 8"-NG2A-CS300A.

Esta instalación, en lo referente a equipos a presión, consiste en pequeños tramos de tubería (y sus elementos accesorios de corte, protección de seguridad y regulación) para la conducción de nitrógeno gas de muy alta pureza.

Los planos que representan isométricamente el sistema de tuberías relacionadas con el compresor se encuentran en el documento "Planos" y son:

- Plano nº10 "NG1A-002", el cual representa el tramo de aspiración del compresor.



- Plano nº11 “NG1A-003”, el cual representa el tramo de recirculación del nitrógeno a baja presión procedente del aftercooler.
- Plano nº12 “NG2A-000”, el cual representa el tramo de descarga del compresor hacia el aftercooler.
- Plano nº13 “NG2A-001”, el cual representa el tramo de salida del aftercooler y la conexión con el carrete embreado.

4.5.2.- Cooling Water Supply

Se diseñó e instaló nuevo un sistema de tuberías, que entronca con el existente, que transportan el suministro de agua de refrigeración en cada intercooler (intercambiador de calor) y aftercooler para la refrigeración del nitrógeno después de que trabaje cada etapa del compresor.

El plano nº18 “CWS-000” representa dicho sistema y se encuentran en el documento “Planos”.

4.5.3.- Cooling Water Return

Se diseñó e instaló nuevo un sistema de tuberías, que entronca con el existente, que transportan el retorno del agua de refrigeración de cada intercooler (intercambiador de calor) y aftercooler para la refrigeración del nitrógeno después de que trabaje cada etapa del compresor.

El plano nº19 “CWR-000” representa dicho sistema y se encuentran en el documento “Planos”.

4.5.4.- Aftercooler

El aftercooler es el cuarto y último intercambiador de calor, que impulsa el nitrógeno a la temperatura deseada al nitroducto de descarga. La instalación es ajena de la del compresor, por lo tanto, requiere de un tramo de aspiración y descarga.

Los planos en los que se representa son el plano nº18 “CWS-000” y plano nº19 “CWR-000”.

El aftercooler es propiedad de la empresa y se trata de un equipo a presión reutilizado. La propia empresa es la encargada de su instalación y cuya ejecución consta de los siguientes pasos:

- Cimentación y obra civil.
- Suministro de agua para enfriamiento.
- Conexión con línea de aspiración desde salida del nitrógeno a media presión del nuevo BLNC#2, en la tubería 8”-NG2A-CS300A.
- Línea de gas comprimido desde la descarga del equipo hasta la tubería 8”-NG2A-CS300A.



5.- ESTUDIO INSTALACIÓN NUEVO NITRODUCTO

Gracias a la instalación de este nuevo compresor de mayor capacidad se conseguirá cumplir eficazmente con la mayor demanda acordada con el cliente. El mayor caudal a suministrar, el cual será prácticamente el doble la mayor parte del tiempo por el nitroducto que actualmente conduce el nitrógeno desde Gijón III hasta el M9, implicará una mayor pérdida de carga por el actual nitroducto de casi 4 veces superior a la actual, lo que supondrá que los compresores tengan que elevar la presión de descarga del N₂ respecto a la actual. La mayor presión de descarga acarrea un mayor trabajo para los compresores, así como un mayor gasto energético y una disminución en las prestaciones de las máquinas.

En conclusión, parece clara la necesidad de dotar a la instalación de un nuevo nitroducto, para que así, las pérdidas de presión a vencer sean menores y conseguir una mejora en las prestaciones de los compresores. Para ello se estudiará en el siguiente punto la posibilidad de su instalación, y en tal caso de las ventajas que generaría.

A la vista del problema planteado y una vez instalado el nuevo compresor, se estudiará la posibilidad de instalación de una nueva tubería de descarga para la conducción del nitrógeno desde la salida de ambos compresores hasta el M9 para cumplir con la demanda y además de ello disminuir el gasto energético de cada compresor, con lo cual supondría un ahorro económico.

Para decidir si se realiza la instalación de una nueva tubería de descarga se realizará un estudio sobre las pérdidas de carga que se generarían y la ganancia de presión que supondría una nueva tubería para la conducción del nitrógeno hasta el M9.

5.1.- PÉRDIDAS DE CARGA

La pérdida de carga en una tubería o canal es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las transporta.

Existen dos tipos de pérdidas de carga, las lineales y las singulares. La diferencia reside en que las pérdidas de carga singulares se producen en elementos singulares, es decir, aquellos cuya sección transversal no permanece constante.

5.1.1.- Pérdidas lineales

En el caso de las pérdidas lineales usamos la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación (5.1), que es una ecuación empírica que relaciona la pérdida de carga hidráulica (o pérdida de presión) debido a la fricción a lo largo de una tubería dada con la velocidad media del flujo del fluido.



$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} [m] \quad (5.1)$$

La ecuación de Darcy-Weisbach contiene un factor adimensional, conocido como el factor de fricción de Darcy o de Darcy-Weisbach.

Siendo:

- h_f : pérdida de carga debida a la fricción (m)
- L : longitud de la tubería (m)
- D_i : diámetro interior de la tubería (m)
- v : velocidad media del fluido para las condiciones en la descarga (m/s)
- f : factor de fricción o coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach.
- g : gravedad (9,81 m/s²)

El cálculo del factor de fricción depende del régimen de flujo, el cual puede ser laminar o turbulento. El régimen de flujo depende del número de Reynolds:

$$R_e = \frac{D_i \cdot v \cdot \rho}{\nu} \quad (5.2)$$

Siendo:

- D_i : diámetro interior de la tubería(m)
- v : velocidad media del fluido para las condiciones en la descarga (m/s)
- ρ : densidad del fluido para las condiciones en la descarga (kg/m³)
- ν : viscosidad dinámica del fluido (Pa·s)

Por lo tanto, el régimen de flujo puede ser:

- Laminar: cuando $R_e < 2300$
- Turbulento: cuando $R_e > 4000$

Sabiendo esto, las ecuaciones para calcular el factor de fricción en función del flujo son:

- Cuando el régimen es laminar:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (5.3)$$

- Cuando el régimen es turbulento usamos la ecuación de Colebrook simplificada:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon_r^{1,11}}{3,7} \right) \right) \quad (5.4)$$

Siendo:



- ε_r : rugosidad relativa

Con los datos obtenidos de las ecuaciones (5.2),(5.3) en caso de régimen laminar o (5.4) en caso de régimen turbulento, datos calculamos las pérdidas h_f (m) de la ecuación (5.1).

Por último, calculamos las pérdidas lineales en unidades de presión (barg):

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_f \text{ [barg]} \quad (5.5)$$

Siendo:

- ρ : densidad del fluido para las condiciones en la descarga (kg/m^3)
- g : gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

5.1.2.- Pérdidas singulares

En el caso de las pérdidas de carga singulares usamos la siguiente ecuación, que es para cada elemento singular:

$$h_v = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ [m]} \quad (5.6)$$

Siendo:

- v : velocidad media del fluido para las condiciones en la descarga (m/s)
- g : gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- K : coeficiente de pérdidas de carga singulares

El valor del coeficiente de pérdidas de carga singulares es específico para cada elemento singular que contenga la tubería.

Para saber el valor usamos la siguiente tabla que es una adaptación de Cameron Hydraulic data, en función del diámetro nominal:



| Accesorios | L/D | Diámetro nominal (en pulgadas) | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--------------------------------|------|------|-------|-------|------|---------|------|------|------|-------|-------|------|
| | | 1/2 | 3/4 | 1 | 1 1/4 | 1 1/2 | 2 | 2 1/2-3 | 4 | 6 | 8-10 | 12-16 | 18-24 | |
| | | Valores de K | | | | | | | | | | | | |
| Válv.de compuerta(abierta) | 8 | 0.22 | 0.2 | 0.18 | 0.18 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.1 | 0.1 | |
| Válv.de globo(abierta) | 340 | 9.2 | 8.5 | 7.8 | 7.5 | 7.1 | 6.5 | 6.1 | 5.8 | 5.1 | 4.8 | 4.4 | 4.1 | |
| Válv.de retención horizontal(check) | 100 | 2.7 | 2.5 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | |
| Válv.de retención horizontal oscilatoria(check) | 50 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.75 | 0.7 | 0.65 | 0.6 | |
| Válv.de pie de disco(de huso)con colador | 420 | 11.3 | 10.5 | 9.7 | 9.3 | 8.8 | 8.0 | 7.6 | 7.1 | 6.3 | 5.9 | 5.5 | 5.0 | |
| Válv.de pie de disco con bisagra | 75 | 2 | 1.9 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.9 | |
| Codos estándar | 90° | 30 | 0.81 | 0.75 | 0.69 | 0.66 | 0.63 | 0.57 | 0.54 | 0.51 | 0.45 | 0.42 | 0.39 | 0.36 |
| | 45° | 16 | 0.43 | 0.4 | 0.37 | 0.35 | 0.34 | 0.3 | 0.29 | 0.27 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.19 |
| | 90° radio largo | 16 | 0.43 | 0.4 | 0.37 | 0.35 | 0.34 | 0.3 | 0.29 | 0.27 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.19 |
| | 180° | 50 | 1.35 | 1.25 | 1.15 | 1.10 | 1.05 | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.75 | 0.7 | 0.65 | 0.6 |
| Curvas de 90° | 20 | 0.54 | 0.5 | 0.46 | 0.44 | 0.42 | 0.38 | 0.36 | 0.34 | 0.3 | 0.28 | 0.26 | 0.24 | |
| T en línea (con derivación en la línea principal y lateral cerrada) | 20 | 0.54 | 0.5 | 0.46 | 0.44 | 0.42 | 0.38 | 0.36 | 0.34 | 0.3 | 0.28 | 0.26 | 0.24 | |
| T en línea (con circulación por derivación) | 60 | 1.62 | 1.5 | 1.38 | 1.32 | 1.26 | 1.14 | 1.08 | 1.02 | 0.9 | 0.84 | 0.78 | 0.72 | |

Figura 5.1.- Coeficiente de pérdidas de carga singulares (K)

Una vez sabemos el coeficiente de pérdida de carga de cada elemento singular presente en el tramo de tubería de descarga, se calculan las pérdidas de carga h_v (m) de la ecuación (5.6).

Por último, calculamos las pérdidas singulares en unidades de presión (barg):

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_v \text{ [barg]} \quad (5.7)$$

Siendo:

- ρ : densidad del fluido para las condiciones en la descarga (kg/m^3)
- g : gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

5.2.- DATOS Y CÁLCULOS PREVIOS

Sabemos que la densidad para el nitrógeno en condiciones estándar (273 K y 1,013 barg) es $1,2507 \text{ kg/m}^3$ (ecuación (3.1))

Para poder calcular las pérdidas de carga son necesarias las condiciones en las que se encuentra el nitrógeno a media presión una vez impulsado por el compresor hacia el M9.

- Temperatura de salida: $T_{sal} = 30^\circ\text{C}$
- Viscosidad dinámica: $\nu = 0,000017 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Rugosidad relativa: $\varepsilon_r = 0,025$
- Gravedad: $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- Densidad (ecuación (5.8)): la cual es función de la temperatura y presión de descarga. Se calcula a partir de la densidad en condiciones estándar (ecuación (3.1)).



$$\rho = 1,2507 \cdot \frac{273 \text{ K}}{(273 + T_{sal})^{\circ\text{K}}} \cdot \frac{P_{sal}}{1.013 \text{ barg}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (5.8)$$

- Caudal volumétrico (ecuación (5.9)): el cual es función de la temperatura y presión de descarga. Se calcula a partir del caudal volumétrico medido en condiciones normales.

$$Q_{sal} = Q_v \cdot \frac{1}{3600 \text{ seg}} \cdot \frac{1,013 \text{ bar}}{P_{sal}} \cdot \frac{(273 + T_{sal})^{\circ\text{K}}}{273^{\circ\text{K}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (5.9)$$

- Velocidad media (ecuación (5.10)):

$$v_{sal} = \frac{Q_{sal}}{\frac{\pi \cdot D_i^2}{4}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (5.10)$$

5.3.- PÉRDIDAS NITRODUCTO ACTUAL

La tubería que ejerce de conducción hasta el medidor M9 para el nitrógeno a alta presión impulsado por los compresores se llama nitroducto, y para ser más específicos: 8"-NG2-CS300A. Este nitroducto discurre por un rack de tuberías que va desde la salida desde los compresores hasta el mencionado M9, cuyo diámetro nominal es de 8" STD ASME B 36.10/19, construida en acero al carbono SA-106-Gr. B, que se ejecutó y puso en marcha en el año 1996.

En primer lugar, se realizará un cálculo aproximado sobre las pérdidas que se generarían actualmente por el nitroducto existente en el caso de conducir el nitrógeno impulsado por los dos compresores. Para calcular las pérdidas hay que separar los elementos lineales de la tubería, y los elementos singulares, que son aquellos elementos cuya sección transversal no permanece constante, que contiene de origen a destino: codos, T's y válvulas.

El nitroducto de 8" tiene las siguientes características:

- Diámetro $D_e = 0,2191 \text{ m}$
- Espesor $e = 0,00818 \text{ m}$
- Diámetro interior: $D_i = D_e - 2 \cdot e = 0,20274 \text{ m}$

El nitroducto actual contiene a lo largo de su conducción:

- Elementos lineales: 117 metros de tubería
- Elementos Singulares:
 - Codos de 90° de radio largo: 8
 - T's: 2
 - Válvulas de mariposa: 1



Una vez que sabemos que se trata de una tubería de diámetro nominal de 8", los elementos singulares también deben ser de 8", por lo tanto, sacamos de la Figura 5.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los coeficientes de pérdidas de carga K para cada elemento singular:

- Para los codos: $K_{codo} = 0,22$
- Para las T's: $K_T = 0,89$
- Para las válvulas: $K_{val} = 1,1$

5.3.1.- Cálculo pérdidas de carga

Para realizar el cálculo de las pérdidas de carga usaremos un rango de valores para la presión de descarga del nitrógeno, de 16 a 17 barg, en intervalos de 0,1 barg. Para cada valor de P_{sal} calculamos su densidad (ecuación (5.8)), Q_{sal} (ecuación (5.9)) y v_{sal} (ecuación (5.10)) correspondiente.

Una vez obtenidos los datos anteriores se procede a calcular las pérdidas lineales para cada presión de salida tal y como se explicó en el punto de pérdidas lineales (apartado 5.1.2.-) y usando los datos y cálculos previos (apartado 5.2.-). Primero se obtiene el número de Reynolds (ecuación (5.2)), con el cual sabremos el régimen del flujo (laminar o turbulento) para después obtener el factor de fricción f (ecuación (5.3) en caso de régimen laminar o ecuación (5.4) en caso de régimen turbulento) y por último las pérdidas h_f (ecuación (5.1))

Con estos datos se obtiene el valor buscado de pérdida de presión lineal: Δp en barg (ecuación (5.5))

Después calculamos las pérdidas singulares para cada presión de salida tal y como se explicó en el punto de pérdidas singulares (apartado 5.1.2.-), usando los datos y cálculos previos (apartado 5.2.-) y los coeficientes de pérdidas de carga (K). Se obtienen las pérdidas h_v (ecuación (5.6)), que en el caso de que haya más de un elemento singular igual, se le multiplica a la ecuación por el número de elementos iguales.

Con estos datos se obtiene el valor buscado de pérdida de presión singular: Δp en barg (ecuación (5.7)).

Posteriormente a la instalación del nuevo compresor se espera que el caudal demandado y por lo tanto a suministrar sea de unos 22.000 Nm³/h. Para realizar los cálculos suponemos que el BLNC#1 realice el mismo trabajo que en el año 2017, impulsando 11.216,16 Nm³/h de media al año y el resto será suministrado por el nuevo compresor, es decir, unos 11.000 Nm³/h de media al año, pero este valor puede ser superior.

A la vista de lo anterior estudiaremos diferentes situaciones de caudal conducido por el nitroducto para realizar la posterior comparación. Hay que mencionar que los caudales mencionados son en condiciones normales, por lo tanto, como se explicó anteriormente se pasan a las condiciones de descarga.



5.3.1.1.- Primer escenario

El primer escenario se trata para cuando el caudal a transportar sea únicamente el procedente del BLNC#1 según indica el diseño realizado.

El caudal sería:

$$Q_V = 11.216,16 \frac{Nm^3}{h}$$

Las pérdidas de carga, tanto las lineales como las singulares de cada elemento singular aparecen calculadas en los anexos en el apartado 2.1.1.

Pérdidas totales, que es la suma de las lineales y cada una de las singulares, para cada presión de compresión en la descarga son:

| Psal (barg) | Δp total (barg) |
|-------------|-------------------------|
| 16 | 0,1514 |
| 16,1 | 0,1505 |
| 16,2 | 0,1495 |
| 16,3 | 0,1486 |
| 16,4 | 0,1477 |
| 16,5 | 0,1468 |
| 16,6 | 0,1459 |
| 16,7 | 0,1451 |
| 16,8 | 0,1442 |
| 17 | 0,1425 |

Tabla 5.1.-Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Primer escenario

5.3.1.2.- Segundo escenario

El segundo escenario se trata para cuando el caudal a transportar sea el procedente del BLNC#1 y el nuevo BLNC#2. Para dicho escenario el caudal impulsado por el BLNC#1 es el mismo que en el primer escenario y el del BLNC#2 de 11.000 Nm³/h.

El caudal total sería:

$$Q_V = 22.216,16 \frac{Nm^3}{h}$$

Las pérdidas de carga, tanto las lineales como las singulares de cada elemento singular aparecen calculadas en los anexos en el apartado 2.1.2.

Pérdidas totales, que es la suma de las lineales y cada una de las singulares, para cada presión de compresión en la descarga son:

| Psal (barg) | Δp total (barg) |
|-------------|-------------------------|
| 16 | 0,5940 |
| 16,1 | 0,5903 |
| 16,2 | 0,5867 |



| | |
|------|--------|
| 16,3 | 0,5831 |
| 16,4 | 0,5795 |
| 16,5 | 0,5760 |
| 16,6 | 0,5726 |
| 16,7 | 0,5691 |
| 16,8 | 0,5657 |
| 17 | 0,5591 |

Tabla 5.2.- Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Segundo escenario

5.3.1.3.- Tercer escenario

El segundo escenario se trata para cuando el caudal a transportar sea el procedente del BLNC#1 y el nuevo BLNC#2. Para dicho escenario el caudal impulsado por el BLNC#1 es el mismo que en el primer escenario y el del BLNC#2 de 12.000 Nm³/h.

El caudal total sería:

$$Q_v = 23.216,16 \frac{Nm^3}{h}$$

Las pérdidas de carga, tanto las lineales como las singulares de cada elemento singular aparecen calculadas en los anexos en el apartado 2.1.3.

Pérdidas totales, que es la suma de las lineales y cada una de las singulares, para cada presión de compresión en la descarga son:

| Psal (barg) | Δp total (barg) |
|-------------|-------------------------|
| 16 | 0,6487 |
| 16,1 | 0,6447 |
| 16,2 | 0,6407 |
| 16,3 | 0,6368 |
| 16,4 | 0,6329 |
| 16,5 | 0,6290 |
| 16,6 | 0,6253 |
| 16,7 | 0,6215 |
| 16,8 | 0,6178 |
| 17 | 0,6105 |

Tabla 5.3.- Pérdidas de carga Nitroducto Actual-Tercer escenario

5.4.- PÉRDIDAS NITRODUCTO NUEVO

La tubería adicional de descarga que ejercerá de apoyo al actual nitroducto repartiéndose la conducción hasta el medidor M9 del nitrógeno a alta presión impulsado por los compresores se llamará 8"-NG2A-CS300A. Este nitroducto discurrirá por el mismo rack de tuberías que el nitroducto actual. El diámetro nominal es de 8" STD ASME B 36.10/19, construida en acero al carbono SA-106-Gr. B.



Según el diseño, el 8"-NG2-CS300A será el encargado de la conducción del nitrógeno impulsado por el BLNC#1 y el 8"-NG2A-CS300A del nitrógeno impulsado por el nuevo BLNC#2, pudiendo incluso repartírsele de diferente forma en caso de necesidad o mantenimiento.

En primer lugar, se realizará un cálculo aproximado sobre las pérdidas que se generarían por el nitroducto que se ha diseñado en el caso de conducir el nitrógeno impulsado por el nuevo BLNC#2. Para calcular las pérdidas hay que separar los elementos lineales de la tubería, y los elementos singulares, que son aquellos elementos cuya sección transversal no permanece constante, que contiene de origen a destino: codos, T's y válvulas.

El nitroducto de 8" tiene las siguientes características:

- Diámetro $D = 0,2191 \text{ m}$
- Espesor $e = 0,00818 \text{ m}$
- Diámetro interior: $D_i = D - 2 \cdot e = 0,20274 \text{ m}$

El nitroducto actual contiene a lo largo de su conducción:

- Elementos lineales: 118 metros de tubería
- Elementos Singulares:
 - Codos de 90° de radio largo: 9
 - T's: 4
 - Válvulas de mariposa: 1

Una vez que sabemos que se trata de una tubería de diámetro nominal de 8", los elementos singulares también deben ser de 8", por lo tanto, sacamos de la Figura 5.1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los coeficientes de pérdidas de carga K para cada elemento singular:

- Para los codos: $K_{codo} = 0,22$
- Para las T's: $K_T = 0,89$
- Para las válvulas: $K_{val} = 1,1$

5.4.1.- Cálculo pérdidas de carga

Para realizar el cálculo de las pérdidas de carga usaremos un rango de valores para la presión de descarga del nitrógeno, de 16 a 17 barg, en intervalos de 0,1 barg. Para cada valor de P_{sal} calculamos su densidad (ecuación (5.8)), Q_{sal} (ecuación (5.9)) y v_{sal} (ecuación (5.10)) correspondiente.

Una vez obtenidos los datos anteriores se procede a calcular las pérdidas lineales para cada presión de salida tal y como se explicó en el punto de pérdidas lineales (5.1.2.-) y usando los datos y cálculos previos (apartado 5.2.-). Primero se obtiene el número de Reynolds (ecuación (5.2)), con el cual sabremos el régimen del flujo (laminar o turbulento) para después obtener el factor de fricción f (ecuación (5.3) en caso de régimen laminar o ecuación (5.4) en caso de régimen turbulento) y por último las pérdidas h_f (ecuación (5.1))



Con estos datos se obtiene el valor buscado de pérdida de presión lineal: Δp en barg (ecuación (5.5))

Después calculamos las pérdidas singulares para cada presión de salida tal y como se explicó en el punto de pérdidas singulares (apartado 5.1.2.-), usando los datos y cálculos previos (apartado 5.2.-) y los coeficientes de pérdidas de carga (K). Se obtienen las pérdidas h_v (ecuación (5.6)), que en el caso de que haya más de un elemento singular igual, se le multiplica a la ecuación por el número de elementos iguales.

Con estos datos se obtiene el valor buscado de pérdida de presión singular: Δp en barg (ecuación (5.7)).

Posteriormente a la instalación del nuevo compresor se espera que el caudal demandado y por lo tanto a suministrar sea de unos 22.000 Nm³/h. Para realizar los cálculos suponemos que el BLNC#1 realice el mismo trabajo que en el año 2017, impulsando 11.216,16247 Nm³/h de media al año y el resto será suministrado por el nuevo compresor, es decir, unos 11.000 Nm³/h de media al año, pero este valor puede ser superior.

A la vista de lo anterior estudiaremos diferentes situaciones de caudal conducido por el nitroducto para realizar la posterior comparación. Hay que mencionar que los caudales mencionados son en condiciones normales, por lo tanto, como se explicó anteriormente se pasan a las condiciones de descarga.

5.4.1.1.- Cuarto escenario

El cuarto escenario se trata para cuando el caudal a transportar sea únicamente el procedente del BLNC#2, según indica el diseño realizado. Para dicho escenario el caudal impulsado por el BLNC#1 es el mismo que en el primer escenario del nitroducto actual. Este escenario se combina con el primer y segundo escenario del nitroducto actual, según indica el diseño realizado.

El caudal sería:

$$Q_v = 11.000 \frac{Nm^3}{h}$$

Las pérdidas de carga, tanto las lineales como las singulares de cada elemento singular aparecen calculadas en los anexos en el apartado 2.2.1.

Pérdidas totales, que es la suma de las lineales y cada una de las singulares, para cada presión de compresión en la descarga son:

| Psal (barg) | Δp total (barg) |
|--------------------|---|
| 16 | 0,1546 |
| 16,1 | 0,1536 |
| 16,2 | 0,1527 |
| 16,3 | 0,1517 |
| 16,4 | 0,1508 |
| 16,5 | 0,1499 |



| | |
|------|--------|
| 16,6 | 0,1490 |
| 16,7 | 0,1481 |
| 16,8 | 0,1472 |
| 17 | 0,1455 |

Tabla 5.4.- Pérdidas de carga Nitroducto Nuevo-Cuarto escenario

5.4.1.2.- Quinto escenario

El quinto escenario se trata para cuando el caudal a transportar sea únicamente el procedente del BLNC#2, según indica el diseño realizado. Para dicho escenario el caudal impulsado por el BLNC#1 es el mismo que en el primer escenario del nitroducto actual. Este escenario se combina con el primer y tercer escenario del nitroducto actual, según indica el diseño realizado.

El caudal sería:

$$Q_v = 12.000 \frac{Nm^3}{h}$$

Las pérdidas de carga, tanto las lineales como las singulares de cada elemento singular aparecen calculadas en los anexos en el apartado 2.2.2.

Pérdidas totales, que es la suma de las lineales y cada una de las singulares, para cada presión de compresión en la descarga son:

| Psal (barg) | Δp total (barg) |
|-------------|-------------------------|
| 16 | 0,1840 |
| 16,1 | 0,1828 |
| 16,2 | 0,1817 |
| 16,3 | 0,1806 |
| 16,4 | 0,1795 |
| 16,5 | 0,1784 |
| 16,6 | 0,1773 |
| 16,7 | 0,1763 |
| 16,8 | 0,1752 |
| 17 | 0,1731 |

Tabla 5.5.- Pérdidas de carga Nitroducto Nuevo-Quinto escenario

5.5.- COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS

En vista de los resultados que observamos en los apartados 5.3.1.- y 5.4.1.- sobre las pérdidas de carga que se producirían en los nitroductos, realizaremos una comparación entre los diferentes escenarios de caudal impulsado por cada compresor y el caudal que acogerá cada nitroducto. Con esta comparación sabremos en función de las pérdidas de carga la presión de descarga que debe realizar cada compresor para cumplir el objetivo de que al M9 deben llegar los 16 barg. Una vez que sabemos la presión de descarga que debe alcanzarse,



sabremos la potencia que precisa cada compresor para lograr el objetivo. Con la potencia generada por cada motor de los compresores tendremos la energía consumida a lo largo de todo un año (8760 horas) y con los resultados obtenidos sabremos si se produce el suficiente ahorro en energía y por tanto económico que haga factible la instalación de un nuevo nitroducto de descarga.

5.5.1.- Primera comparación

En este apartado compararemos la diferencia de las pérdidas de carga que se producen en el caso de que ambos BLNC's impulsen un total de 22.216,16 Nm³/h. Para este caso se realizará la comparación de que el total del caudal se conduzca por el nitroducto actual donde las pérdidas son obtenidas en el segundo escenario (apartado 5.3.1.2.-) con la situación de que el caudal se divida según el primer (apartado 5.3.1.1.-) y cuarto (apartado 5.4.1.1.-) escenario respectivamente, con sus pérdidas de carga calculadas en dichos apartados.

| | NiAct | NiAct | NiNuevo |
|--|------------|------------|------------|
| Q_v (m³/h) | 22.216,16 | 11.216,16 | 11.000 |
| Psal (barg) | Δp1 (barg) | Δp2 (barg) | Δp3 (barg) |
| 16 | 0,5940 | 0,1514 | 0,1546 |
| 16,1 | 0,5903 | 0,1505 | 0,1536 |
| 16,2 | 0,5867 | 0,1495 | 0,1527 |
| 16,3 | 0,5831 | 0,1486 | 0,1517 |
| 16,4 | 0,5795 | 0,1477 | 0,1508 |
| 16,5 | 0,5760 | 0,1468 | 0,1499 |
| 16,6 | 0,5726 | 0,1459 | 0,1490 |
| 16,7 | 0,5691 | 0,1451 | 0,1481 |
| 16,8 | 0,5657 | 0,1442 | 0,1472 |
| 17 | 0,5591 | 0,1442 | 0,1472 |

Tabla 5.6.-Primera comparación pérdidas de carga

Como se puede observar, las pérdidas de reducen de forma considerable si el caudal total suministrado por ambos compresores se transporta mediante dos tuberías y no por una.

5.5.1.1.- Ganancia de presión

La ganancia de presión consiste en la diferencia de pérdidas de carga que se producen al dividir el caudal a suministrar entre ambos nitroductos con el caudal total suministrado solamente por el primer nitroducto, pues a menor caudal menor pérdida de carga.

| | |
|--------------------------------|--------|
| $GPI = \Delta p1 - \Delta p2$ | (5.11) |
| $GPII = \Delta p1 - \Delta p3$ | (5.12) |

Siendo GPI la ganancia de presión producida en el nitroducto actual y GPII la ganancia de presión producida en el nitroducto nuevo.



| | NiAct | NiAct | NiNuevo | NiAct | NiNuevo |
|--|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Q_v (m³/h) | 22.216,16 | 11.216,16 | 11.000 | | |
| Psal (barg) | Δp1 (barg) | Δp2 (barg) | Δp3 (barg) | GPI (barg) | GPII (barg) |
| 16 | 0,5940 | 0,1514 | 0,1546 | 0,4426 | 0,4394 |
| 16,1 | 0,5903 | 0,1505 | 0,1536 | 0,4398 | 0,4367 |
| 16,2 | 0,5867 | 0,1495 | 0,1527 | 0,4371 | 0,4340 |
| 16,3 | 0,5831 | 0,1486 | 0,1517 | 0,4344 | 0,4313 |
| 16,4 | 0,5795 | 0,1477 | 0,1508 | 0,4318 | 0,428 |
| 16,5 | 0,5760 | 0,1468 | 0,1499 | 0,4292 | 0,4261 |
| 16,6 | 0,5726 | 0,1459 | 0,1490 | 0,4266 | 0,4235 |
| 16,7 | 0,5691 | 0,1451 | 0,1481 | 0,4240 | 0,4210 |
| 16,8 | 0,5657 | 0,1442 | 0,1472 | 0,4215 | 0,4185 |
| 17 | 0,5591 | 0,1442 | 0,1472 | 0,4148 | 0,4118 |

Tabla 5.7.-Ganancia de presión primera comparación

Como se puede observar se obtiene una ganancia de presión muy favorable.

5.5.1.2.- Presión de descarga

La presión de descarga del nitrógeno debe ser aquella superior a las pérdidas de carga producidas para llegar a la zona del M9 con una presión igual o superior a 16 barg.

| | |
|---|--------|
| $P_{descarga} = P_{inicial} - \Delta p1 \geq 16 \text{ barg}$ | (5.13) |
| $PI = P_{inicial} - \Delta p2 \geq 16 \text{ barg}$ | (5.14) |
| $PII = P_{inicial} - \Delta p3 \geq 16 \text{ barg}$ | (5.15) |

Siendo $P_{descarga}$ la presión de descarga que deben producir el BLNC#1 y el BLNC#2 nuevo en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual, PI la presión de descarga que debe producir el BLNC#1 en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual y del nitroducto nuevo y PII la presión de descarga que debe producir el BLNC#2 nuevo en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual y del nitroducto nuevo.

En el caso de que la casilla contenga “no vale”, quiere decir que la presión de descarga inicial no está permitida al tener una pérdida de carga que al llegar al M9, hará que dicha presión sea inferior a 16 barg. En el caso de que aparezca el valor de la presión de descarga como la inicial, quiere decir que dicha presión si está permitida.

| | NiAct | NiAct | NiNuevo | NiAct | NiAct | NiNuevo |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
| Q_v (m³/h) | 22.216,16 | 11.216,16 | 11.000 | | | |
| Psal (barg) | Δp (barg) | Δp (barg) | Δp (barg) | Pdescarga | PI | PII |
| 16 | 0,5940 | 0,1514 | 0,1546 | no vale | no vale | no vale |
| 16,1 | 0,5903 | 0,1505 | 0,1536 | no vale | no vale | no vale |



| | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|---------|------|------|
| 16,2 | 0,5867 | 0,1495 | 0,1527 | no vale | 16,2 | 16,2 |
| 16,3 | 0,5831 | 0,1486 | 0,1517 | no vale | 16,3 | 16,3 |
| 16,4 | 0,5795 | 0,1477 | 0,1508 | no vale | 16,4 | 16,4 |
| 16,5 | 0,5760 | 0,1468 | 0,1499 | no vale | 16,5 | 16,5 |
| 16,6 | 0,5726 | 0,1459 | 0,1490 | 16,6 | 16,6 | 16,6 |
| 16,7 | 0,5691 | 0,1451 | 0,1481 | 16,7 | 16,7 | 16,7 |
| 16,8 | 0,5657 | 0,1442 | 0,1472 | 16,8 | 16,8 | 16,8 |
| 17 | 0,5591 | 0,1442 | 0,1472 | 17 | 17 | 17 |

Tabla 5.8.-Presión de descarga primera comparación

Como podemos observar en el caso de usar únicamente el nitroducto actual debemos impulsar el nitrógeno a una presión de 16,6 barg como mínimo, que en comparación de usar dos nitroductos la presión de descarga baja hasta 16,2 barg como mínimo, es decir supone un gran beneficio para el rendimiento del compresor.

5.5.1.3.- Potencia de compresión y energía consumida

Para cada presión de descarga y caudal impulsado, el compresor precisa de diferentes valores de potencia, los cuales se obtuvieron de test realizados por la empresa proveedora y de pruebas realizadas una vez en marcha.

Tomando los valores de presión de descarga permitidos de la Tabla 5.8, en las siguientes tablas se representa los valores de potencia que se generan en ambos compresores para cada presión de descarga producida y caudal impulsado.

| | NiAct | |
|--|-----------|----------------------|
| Q_v (m³/h) | 22.216,16 | |
| BLNC#1 | | |
| Psal (barg) | Pdescarga | Potencia BLNC#1 (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | no vale | nada |
| 16,3 | no vale | nada |
| 16,4 | no vale | nada |
| 16,5 | no vale | nada |
| 16,6 | 16,6 | 1.628 |
| 16,7 | 16,7 | 1.628 |
| 16,8 | 16,8 | 1.628 |
| 17 | 17 | 1.628 |

Tabla 5.9.-Potencia generada BLNC#1 primera comparación 22.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiAct | |
|--|-----------|--|
| Q_v (m³/h) | 11.216,16 | |



| BLNC#1 | | |
|-------------|---------|----------------------|
| Psal (barg) | PI | Potencia BLNC#1 (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | 16,2 | 1.595 |
| 16,3 | 16,3 | 1.604 |
| 16,4 | 16,4 | 1.612 |
| 16,5 | 16,5 | 1.628 |
| 16,6 | 16,6 | 1.628 |
| 16,7 | 16,7 | 1.628 |
| 16,8 | 16,8 | 1.628 |
| 17 | 17 | 1.628 |

Tabla 5.10.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 11.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiAct | |
|------------------------|-------------|----------------------|
| Qv (m ³ /h) | 22.216,1625 | |
| BLNC#2 | | |
| Psal (barg) | Pdescarga | Potencia BLNC#2 (KW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | no vale | nada |
| 16,3 | no vale | nada |
| 16,4 | no vale | nada |
| 16,5 | no vale | nada |
| 16,6 | 16,6 | 1.548 |
| 16,7 | 16,7 | 1.551 |
| 16,8 | 16,8 | 1.554 |
| 17 | 17 | 1.560 |

Tabla 5.11.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 22.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiNuevo | |
|------------------------|---------|----------------------|
| Qv (m ³ /h) | 11.000 | |
| BLNC#2 | | |
| Psal (barg) | PII | Potencia BLNC#2 (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | 16,2 | 1.535 |
| 16,3 | 16,3 | 1.539 |
| 16,4 | 16,4 | 1.542 |
| 16,5 | 16,5 | 1.545 |
| 16,6 | 16,6 | 1.548 |
| 16,7 | 16,7 | 1.551 |



| | | |
|-------------|------|-------|
| 16,8 | 16,8 | 1.554 |
| 17 | 17 | 1.560 |

Tabla 5.12.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 11.000 Nm³/h por Nitroducto Nuevo.

5.5.1.4.- Energía consumida y Ahorro

Como sabemos de las Tabla 5.9 y Tabla 5.10 que para el BLNC#1 las presiones de descarga pueden ser 16,6 barg o 16,2 barg, las potencias asociadas serían respectivamente 1.628 KW y 1.595 KW. Para calcular la energía debemos multiplicar la potencia por el número de horas en funcionamiento al año, el cual sería 8.760 horas/año:

$$Energía_{BLNC\#1, P_{descarga}} = 1.628kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 14.261.280 \frac{kWh}{año} \quad (5.16)$$

$$Energía_{BLNC\#1, PI} = 1.595kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 13.972.200 \frac{kWh}{año} \quad (5.17)$$

El ahorro de energía producida sería la diferencia de ambos datos:

$$Ahorro energía = 14.261.280 - 13.972.200 = 289.080 \frac{kWh}{año} \quad (5.18)$$

El ahorro económico producido se calcula multiplicando el valor de la ecuación (5.18) por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$Ahorro económico = 289.080 \cdot 9,34 = 27.018,62 \text{ €} \quad (5.19)$$

Como sabemos de las Tabla 5.11 y Tabla 5.12 que para el BLNC#2 las presiones de descarga pueden ser 16,6 barg o 16,2 barg, las potencias asociadas serían respectivamente 1.548 KW y 1.535 KW. Para calcular la energía debemos multiplicar la potencia por el número de horas en funcionamiento al año, el cual sería 8.760 horas/año:

$$Energía_{BLNC\#2, P_{descarga}} = 1.548kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 13.560.480 \frac{kWh}{año} \quad (5.20)$$

$$Energía_{BLNC\#2, PII} = 1.535kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 13.446.600 \frac{kWh}{año} \quad (5.21)$$

El ahorro de energía producida sería la diferencia de ambos datos:

$$Ahorro energía = 13.586.760 - 13.446.600 = 113.880 \frac{kWh}{año} \quad (5.22)$$

El ahorro económico producido se calcula multiplicando el valor de la ecuación (5.18) por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$Ahorro económico = 140.160 \cdot 9,34 = 10.636,4 \text{ €} \quad (5.23)$$



En vista de los ahorros económicos producidos debido al menor gasto de energía por parte de los dos compresores al instalar un segundo nitroducto de descarga, resulta necesario y ventajoso realizar dicha instalación.

5.5.2.- Segunda comparación

En este apartado compararemos la diferencia de las pérdidas de carga que se producen en el caso de que ambos BLNC's impulsen un total de 23.216,167 Nm³/h. Para este caso se realizará la comparación de que el total del caudal se conduzca por el nitroducto actual donde las pérdidas son obtenidas en el segundo escenario (apartado 5.3.1.2.-) con la situación de que el caudal se divida según el primer (apartado 5.3.1.1.-) y quinto (apartado 5.4.1.2.-) escenario respectivamente, con sus pérdidas de carga calculadas en dichos apartados.

| | NiAct | NiAct | NiNuevo |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Q (m³/h) | 23.216,16 | 11.216,16 | 12.000 |
| Psal (barg) | Δp_1 (barg) | Δp_2 (barg) | Δp_3 (barg) |
| 16 | 0,6487 | 0,1514 | 0,1840 |
| 16,1 | 0,6447 | 0,1505 | 0,1828 |
| 16,2 | 0,6407 | 0,1495 | 0,1817 |
| 16,3 | 0,6368 | 0,1486 | 0,1806 |
| 16,4 | 0,6329 | 0,1477 | 0,1795 |
| 16,5 | 0,6290 | 0,1468 | 0,1784 |
| 16,6 | 0,6253 | 0,1459 | 0,1773 |
| 16,7 | 0,6215 | 0,1451 | 0,1763 |
| 16,8 | 0,6178 | 0,1442 | 0,1752 |
| 17 | 0,6105 | 0,1425 | 0,1731 |

Tabla 5.13.- Segunda comparación pérdidas de carga

5.5.2.1.- Ganancia de presión

La ganancia de presión consiste en la diferencia de pérdidas de carga que se producen al dividir el caudal a suministrar entre ambos nitroductos con el caudal total suministrado solamente por el primer nitroducto, pues a menor caudal menor pérdida de carga.

Para este caso utilizamos nuevamente las ecuaciones (5.11) y (5.12) para calcular la ganancia de presión por cada nitroducto.

Siendo GPI la ganancia de presión producida en el nitroducto actual y GPII la ganancia de presión producida en el nitroducto nuevo.

| | NiAct | NiAct | NiNuevo | NiAct | NiNuevo |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-------------|
| Q (m³/h) | 23.216,16 | 11.216,16 | 12.000 | | |
| Psal (barg) | Δp_1 (barg) | Δp_2 (barg) | Δp_3 (barg) | GPI (barg) | GPII (barg) |
| 16 | 0,6487 | 0,1514 | 0,1840 | 0,4973 | 0,4647 |



| | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 16,1 | 0,6447 | 0,1505 | 0,1828 | 0,3113 | 0,4618 |
| 16,2 | 0,6407 | 0,1495 | 0,1817 | 0,3094 | 0,4590 |
| 16,3 | 0,6368 | 0,1486 | 0,1806 | 0,3075 | 0,4561 |
| 16,4 | 0,6329 | 0,1477 | 0,1795 | 0,3056 | 0,4534 |
| 16,5 | 0,6290 | 0,1468 | 0,1784 | 0,3037 | 0,4506 |
| 16,6 | 0,6253 | 0,1459 | 0,1773 | 0,3019 | 0,4479 |
| 16,7 | 0,6215 | 0,1451 | 0,1763 | 0,3001 | 0,4452 |
| 16,8 | 0,6178 | 0,1442 | 0,1752 | 0,2983 | 0,4426 |
| 17 | 0,6105 | 0,1425 | 0,1731 | 0,2948 | 0,4374 |

Tabla 5.14.- Ganancia de presión segunda comparación

Como se puede observar se obtiene una ganancia de presión muy favorable.

5.5.2.2.- Presión de descarga

La presión de descarga del nitrógeno debe ser aquella superior a las pérdidas de carga producidas para llegar a la zona del M9 con una presión igual o superior a 16 barg.

Para calcular las presiones de descarga en cada compresor volvemos a usar las ecuaciones (5.13), (5.14) y (5.15).

Siendo $P_{descarga}$ la presión de descarga que deben producir el BLNC#1 y el BLNC#2 nuevo en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual, P_I la presión de descarga que debe producir el BLNC#1 en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual y del nitroducto nuevo y P_{II} la presión de descarga que debe producir el BLNC#2 nuevo en caso de que el caudal impulsado se transporte a través del nitroducto actual y del nitroducto nuevo.

En el caso de que la casilla contenga “no vale”, quiere decir que la presión de descarga inicial no está permitida al tener una pérdida de carga que al llegar al M9, hará que dicha presión sea inferior a 16 barg. En el caso de que aparezca el valor de la presión de descarga como la inicial, quiere decir que dicha presión si está permitida.

| | NiAct | NiAct | NiNuevo | NiAct | NiAct | NiNuevo |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------|----------|
| Q (m³/h) | 23.216,16 | 11.216,16 | 12.000 | | | |
| Psal (barg) | Δp (barg) | Δp (barg) | Δp (barg) | $P_{descarga}$ | P_I | P_{II} |
| 16 | 0,6487 | 0,1514 | 0,1840 | no vale | no vale | no vale |
| 16,1 | 0,6447 | 0,1505 | 0,1828 | no vale | no vale | no vale |
| 16,2 | 0,6407 | 0,1495 | 0,1817 | no vale | 16,2 | 16,2 |
| 16,3 | 0,6368 | 0,1486 | 0,1806 | no vale | 16,3 | 16,3 |
| 16,4 | 0,6329 | 0,1477 | 0,1795 | no vale | 16,4 | 16,4 |
| 16,5 | 0,6290 | 0,1468 | 0,1784 | no vale | 16,5 | 16,5 |
| 16,6 | 0,6253 | 0,1459 | 0,1773 | no vale | 16,6 | 16,6 |
| 16,7 | 0,6215 | 0,1451 | 0,1763 | 16,7 | 16,7 | 16,7 |
| 16,8 | 0,6178 | 0,1442 | 0,1752 | 16,8 | 16,8 | 16,8 |
| 17 | 0,6105 | 0,1425 | 0,1731 | 17 | 17 | 17 |



Tabla 5.15.- Presión de descarga segunda comparación

Como podemos observar en el caso de usar únicamente el nitroducto actual debemos impulsar el nitrógeno a una presión de 16,7 barg como mínimo, que en comparación de usar dos nitroductos la presión de descarga baja hasta 16,2 barg como mínimo, es decir supone un gran beneficio para el rendimiento del compresor. Cuanto mayor sea el caudal a suministrar mayor beneficio representaría un segundo nitroducto.

5.5.2.1.- Potencia de compresión y energía consumida

Para cada presión de descarga y caudal impulsado, el compresor precisa de diferentes valores de potencia, los cuales se obtuvieron de test realizados por la empresa proveedora y de pruebas realizadas una vez en marcha.

Tomando los valores de presión de descarga permitidos de la Tabla 5.15, en las siguientes tablas se representa los valores de potencia que se generan en ambos compresores para cada presión de descarga producida y caudal impulsado.

| | NiAct | |
|----------------------------|-----------|----------------------|
| Q (m³/h) | 23.216,16 | |
| BLNC#1 | | |
| Psal (barg) | Pdescarga | Potencia BLNC#1 (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | no vale | nada |
| 16,3 | no vale | nada |
| 16,4 | no vale | nada |
| 16,5 | no vale | nada |
| 16,6 | no vale | nada |
| 16,7 | 16,7 | 1.628 |
| 16,8 | 16,8 | 1.628 |
| 17 | 17 | 1.628 |

Tabla 5.16.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 23.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiAct | |
|----------------------------|-----------|----------------------|
| Q (m³/h) | 11.216,16 | |
| BLNC#1 | | |
| Psal (barg) | PI | Potencia BLNC#1 (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | 16,2 | 1.595 |
| 16,3 | 16,3 | 1.604 |
| 16,4 | 16,4 | 1.612 |
| 16,5 | 16,5 | 1.628 |
| 16,6 | 16,6 | 1.628 |
| 16,7 | 16,7 | 1.628 |



| | | |
|-------------|------|-------|
| 16,8 | 16,8 | 1.628 |
| 17 | 17 | 1.628 |

Tabla 5.17.- Potencia generada BLNC#1 primera comparación 11.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiAct | |
|----------------------------|--------------|---------------|
| Q (m³/h) | 23.216,16 | |
| BLNC#2 | | |
| Psal (barg) | Pdescarga | Potencia (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | no vale | nada |
| 16,3 | no vale | nada |
| 16,4 | no vale | nada |
| 16,5 | no vale | nada |
| 16,6 | no vale | nada |
| 16,7 | 16,7 | 1.680 |
| 16,8 | 16,8 | 1.685 |
| 17 | 17 | 1.690 |

Tabla 5.18.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 23.216,1625 Nm³/h por Nitroducto Actual.

| | NiNuevo | |
|----------------------------|----------------|---------------|
| Q (m³/h) | 12.000 | |
| BLNC#2 | | |
| Psal (barg) | PII | Potencia (kW) |
| 16 | no vale | nada |
| 16,1 | no vale | nada |
| 16,2 | 16,2 | 1.660 |
| 16,3 | 16,3 | 1.665 |
| 16,4 | 16,4 | 1.670 |
| 16,5 | 16,5 | 1.675 |
| 16,6 | 16,6 | 1.680 |
| 16,7 | 16,7 | 1.685 |
| 16,8 | 16,8 | 1.690 |
| 17 | 16,9 | 1.690 |

Tabla 5.19.- Potencia generada BLNC#2 primera comparación 11.000 Nm³/h por Nitroducto Nuevo.

5.5.2.2.- Energía consumida y Ahorro

Como sabemos de las Tabla 5.16, y Tabla 5.17 que para el BLNC#1 las presiones de descarga pueden ser 16,7 barg o 16,2 barg, las potencias asociadas serían respectivamente 1.628 KW y 1.595 KW. Para calcular la energía debemos multiplicar la potencia por el número de horas en funcionamiento al año, el cual sería 8.760 horas/año:



$$Energía_{BLNC\#1, Pdescarga} = 1.628kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 14.261.280 \frac{kWh}{año} \quad (5.24)$$

$$Energía_{BLNC\#1, PI} = 1.595kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 13.972.200 \frac{kWh}{año} \quad (5.25)$$

El ahorro de energía producida sería la diferencia de ambos datos:

$$Ahorro energía = 14.261.280 - 13.972.200 = 289.080 \frac{kWh}{año} \quad (5.26)$$

El ahorro económico producido se calcula multiplicando el valor de la ecuación (5.18) por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$Ahorro económico = 289.080 \cdot 9,34 = 27.018,62 \text{ €} \quad (5.27)$$

Como sabemos de las Tabla 5.18 y Tabla 5.19 que para el BLNC#2 las presiones de descarga pueden ser 16,7 barg o 16,2 barg, las potencias asociadas serían respectivamente 1.680 KW y 1.660 KW. Para calcular la energía debemos multiplicar la potencia por el número de horas en funcionamiento al año, el cual sería 8.760 horas/año:

$$Energía_{BLNC\#2, Pdescarga} = 1.680kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 14.716.800 \frac{kWh}{año} \quad (5.28)$$

$$Energía_{BLNC\#2, PII} = 1.660kW \cdot 8.760 \frac{h}{año} = 14.541.600 \frac{kWh}{año} \quad (5.29)$$

El ahorro de energía producida sería la diferencia de ambos datos:

$$Ahorro energía = 14.716.800 - 14.541.600 = 175.200 \frac{kWh}{año} \quad (5.30)$$

El ahorro económico producido se calcula multiplicando el valor de la ecuación (5.18) por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$Ahorro económico = 175.200 \cdot 9,34 = 16.374,92 \text{ €} \quad (5.31)$$

En vista de los ahorros económicos producidos debido al menor gasto de energía por parte de los dos compresores al instalar un segundo nitroducto de descarga, resulta necesario y ventajoso realizar dicha instalación.



6.- INSTALACIÓN NITRODUCTO

NUEVO

La tubería adicional de descarga que ejercerá de apoyo al actual nitroducto repartiéndose la conducción hasta el medidor M9 del nitrógeno a media presión impulsado por los compresores se denominará 8"-NG2A-CS300A. Este nitroducto discurrirá por el mismo rack de tuberías que el nitroducto actual. El diámetro nominal es de 8" STD ASME B 36.10/19, construida en acero al carbono SA-106-Gr. B.

Según el diseño, el 8"-NG2-CS300A será el encargado de la conducción del nitrógeno impulsado por el BLNC#1 y el 8"-NG2A-CS300A del nitrógeno impulsado por el nuevo BLNC#2, pudiendo incluso repartírsele de diferente forma en caso de necesidad o mantenimiento.

Los planos en el que aparecen representada la instalación son el plano nº15 "NG2A-002" y el plano nº17 "NG2A-004", ambos en el documento "Planos".

6.1.- DESCRIPCIÓN

La tubería es construida fundamentalmente en acero al carbono sin soldadura, según se indica en las especificaciones de conducciones de nitrógeno de Praxair.

Destinada específicamente como conducción de nitrógeno gas desde la planta de producción de Praxair en Gijón III, con destino a ArcelorMittal, pasando a través de terrenos propiedad de estas empresas y terrenos ajenos.

Las características principales de la tubería son las siguientes:

- Material de fabricación: Tubería acero al carbono SA-106 B, bridas y forjas A-105
- Diámetro exterior: 219,10 mm
- Espesor: 8,18 mm
- Longitud: 113 m
- Capacidad: 3,62 m³
- Peso en vacío: 4.766 kg
- Peso lleno de agua: 8.382 kg
- Con orificios y conexiones para cumplir sus funciones.
- Con soportes para apoyo en la posición prevista.



6.2.- CONDICIONES DE TRABAJO Y DISEÑO

- Presión de diseño:.....25 barg
- Presión máxima de servicio:.....25 barg
- Temperatura máx./mín. de diseño:60/-20 °C
- Temperatura máx./mín. de servicio:.....55/-5 °C
- Presión de prueba:.....37,5 barg
- Producto:.....Nitrógeno gas
- Grupo de fluido:.....2
- Categoría PED:.....II

6.3.- CÁLCULOS ESFUERZOS

Primero haremos los cálculos del nuevo nitroducto, así como los esfuerzos en los soportes existentes compartiendo el rack con el resto de las tuberías, y comprobaremos los pernos.

6.3.1.- Materiales

A continuación, se reflejan las propiedades mecánicas que se requieren para los cálculos según ASME II Parte D, Edición 2015.

| Propiedad | Material | SA 106 Gr. B / API 5L Gr. B SA 234 WPB | | SA 105 | |
|--|----------|---|-------------------|--------|-------------------|
| | | | | | |
| Límite elástico "S _y " | | 35 | kpsi | 36 | kpsi |
| | | 240,00 | N/mm ² | 250,00 | N/mm ² |
| Tensión admisible a presión interior "S" | | 17,1 | kpsi | 20 | kpsi |
| | | 118,00 | N/mm ² | 138,00 | N/mm ² |
| Módulo elástico "E _m " | | 29733 | kpsi | 29733 | kpsi |
| | | 205000 | N/mm ² | 205000 | N/mm ² |

Tabla 6.1.-Propiedades mecánicas

6.3.2.- Datos de cálculo

Características generales

- Fluido a transportar.....Nitrógeno gas
- Presión máxima admisible.....PS = 25 barg
- Presión de prueba hidráulica.....Pp = 37,5 barg
- Temperatura máxima admisible.....TS = 60°C



| | |
|---|-------------------------------|
| Separación máxima entre soportes..... | $l = 8 \text{ m}$ |
| <u>Características nitroducto 8"</u> | |
| Material: ASTM A106 Gr.B STD | |
| Longitud..... | $L = 118 \text{ m}$ |
| Diámetro nominal..... | $DN = 200 \text{ mm}$ |
| Diámetro exterior..... | $D_e = 219,1 \text{ mm}$ |
| Espesor nominal..... | $8,18 \text{ mm}$ |
| Espesor (espesor nominal menos un 12,5% de tolerancia)..... | $7,16 \text{ mm}$ |
| Diámetro interior..... | $D_i = 204,79 \text{ mm}$ |
| Margen de corrosión exterior..... | $1,6 \text{ mm}$ |
| Margen de corrosión interior..... | 1 mm |
| Diámetro exterior corroído..... | $D_o = 215,9 \text{ mm}$ |
| Espesor de cálculo (Espesor- márgenes de corrosión)..... | $t = 4,56 \text{ mm}$ |
| Diámetro interior corroído..... | $D_{oi} = 206,79 \text{ mm}$ |
| Eficiencia de junta con tensiones circunferenciales..... | $E_C = 1$ |
| Eficiencia de junta con tensiones longitudinales..... | $E_L = 0,7$ |
| Peso por unidad de longitud..... | $q = 42,6 \text{ kg/m}$ |
| Límite elástico..... | $S_y = 240 \text{ N/mm}^2$ |
| Tensión admisible a presión interior..... | $S = 118 \text{ N/mm}^2$ |
| Módulo elástico..... | $E_M = 205000 \text{ N/mm}^2$ |
| Coefficiente de seguridad..... | $S = 1,8$ |

Tensión máxima admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{S} = \frac{240 \frac{N}{mm^2}}{1,8} = 133,33 \frac{N}{mm^2} \quad (6.1)$$

Momento de inercia:

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D_o^4 - D_{oi}^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (215,9^4 \text{ mm}^4 - 206,79^4 \text{ mm}^4) = 16893743,13 \text{ mm}^4 \quad (6.2)$$

Módulo resistente:



$$R = \frac{2 \cdot I}{D_o} = \frac{2 \cdot 16893743,13 \text{ mm}^4}{215,9 \text{ mm}} = 156495,99 \text{ mm}^3 \quad (6.3)$$

Sección tubería:

$$A = \frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_{oi}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (215,9^2 \text{ mm}^2 - 206,79^2 \text{ mm}^2) = 3024,3 \text{ mm}^2 \quad (6.4)$$

Flecha admisible en operación (0,1% de l):

$$f_{ADM,op} = \frac{l}{1000} = \frac{8}{1000} = 0,008 \text{ m} \quad (6.5)$$

Flecha admisible en prueba (0,25% de l):

$$f_{ADM,pr} = \frac{l}{400} = \frac{8}{400} = 0,02 \text{ m} \quad (6.6)$$

6.3.3.- Cálculo a presión

El cálculo a presión se hará según el método del código ASME VIII Div. 1, para una envolvente cilíndrica sometida a presión interior. Se calculará sólo la parte de acero al carbono, ya que es la de inferior tensión admisible y se aplicará condición corroida.

Mínimo espesor requerido:

$$t_{min} = \frac{PS \cdot \frac{D_{oi}}{2}}{S \cdot E_c - 0,6 \cdot PS} = \frac{\frac{25}{10} \text{ MPa} \cdot \frac{206,79}{2} \text{ mm}}{118 \text{ MPa} \cdot 1 - 0,6 \cdot \frac{25}{10} \text{ MPa}} = 2,22 \text{ mm} \quad (6.7)$$

Máxima presión admisible:

$$P_{max} = \frac{S \cdot E_c \cdot t}{\frac{D_{oi}}{2} + 0,6 \cdot t} = \frac{118 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1 \cdot 4,56 \text{ mm}}{\frac{206,79}{2} + 0,6 \cdot 4,56 \text{ mm}} \cdot 10 = 50,7 \text{ barg} \quad (6.8)$$

Presión de Prueba Hidrostática:

$$PH = \text{máx} \left\{ 1,43 \cdot PS \mid 1,25 \cdot PS \cdot \frac{S}{S_t} \right\} = 37,5 \text{ barg} \quad (6.9)$$

Siendo "S" la tensión admisible a temperatura de diseño y "ST" la tensión admisible a temperatura ambiente, en este caso ambas coinciden por tener una temperatura de diseño baja.



Mínimo espesor requerido en condición de prueba hidrostática:

$$t_h = \frac{PH \cdot \frac{D_{oi}}{2}}{0,9 \cdot S_y \cdot E_c - 0,6 \cdot PH} = \frac{\frac{37,5}{10} MPa \cdot \frac{206,79}{2} mm}{0,9 \cdot 240 \frac{N}{mm^2} \cdot 1 - 0,6 \cdot \frac{37,5}{10} MPa} \quad (6.10)$$
$$= 1,81 mm$$

Como $t_h < t_{min} \rightarrow$ CORRECTO

6.3.4.- Esfuerzos o cargas para el cálculo

Al encontrarse la instalación al aire libre, la tubería puede resultar afectada por los efectos ambientales como lo son el viento y la nieve.

6.3.4.1.- Viento

Acción del viento sobre las tuberías y soportes según CTE-SE-AE.

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (6.11)$$

Donde q_e es la fuerza del viento en kN/m^2 , q_b la presión dinámica del viento, c_e el coeficiente de exposición y c_p el coeficiente de presión.

La presión dinámica se obtiene del anejo D del documento básico.

- Para los soportes:

$$q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2 \text{ - Zona geográfica C}$$

$$c_e = 2 \text{ - Coeficiente exposición Tabla 3.4 del CTE-SE-AE (6 metros zona rural accidentada)}$$

$$c_p = 1,2 \text{ - Coeficiente eólico. Efecto más desfavorable para esbeltez } > 5$$

$$c_p = 0,8(\text{presión}) + 0,7(\text{succión}) - 0,3(\text{presión interior}) \quad (6.12)$$

Volviendo a la ecuación (6.11) calculamos la carga del viento sobre los soportes:

$$q_e = 0,52 \cdot 2 \cdot 1,2 = 1,248 \frac{KN}{m^2} \rightarrow 127,217 \frac{kg}{m^2} \quad (6.13)$$

- Para las tuberías:

$$q_b = 0,52 \text{ kN/m}^2 \text{ - Zona geográfica C}$$

$$c_e = 2 \text{ - Coeficiente exposición Tabla 3.4 CTE-SE-AE (6 metros zona rural accidentada)}$$

$$c_p = 0,8 \text{ - Coeficiente eólico. Efecto más desfavorable para esbeltez } > 5$$



$$c_p = 0,8(\text{presión}) \quad (6.14)$$

Volviendo a la ecuación (6.11) calculamos la carga del viento sobre la tubería.

$$q_e = 0,52 \cdot 2 \cdot 0,8 = 0,832 \frac{KN}{m^2} \rightarrow 84,81 \frac{kg}{m^2} \quad (6.15)$$

6.3.4.2.- Nieve

Acción de la nieve sobre las tuberías según CTE-SE-AE.

$$q_n = \mu \cdot s_k \quad (6.16)$$

$s_k = 0,3 \text{ kN/m}^2$ - Zona geográfica 1 (altitud 0 m)

$\mu = 1$ - Coeficiente de forma de la cubierta (inclinación menor o igual a 30°)

Volviendo a la ecuación (6.16) calculamos la carga de la nieve sobre la tubería.

$$q_n = 1 \cdot 0,3 = 0,3 \frac{KN}{m^2} \rightarrow 30,58 \frac{kg}{m^2} \quad (6.17)$$

6.3.5.- Cálculo a esfuerzos combinados (flexión+presión)

El cálculo a resistencia de la tubería se hace para trabajo en operación y para prueba hidráulica.

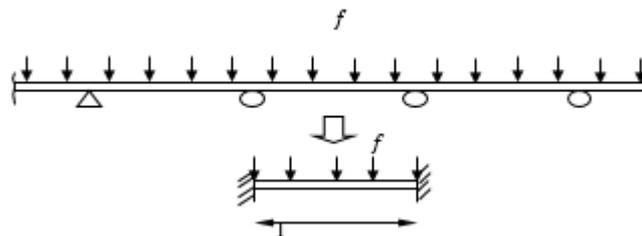


Figura 6.1.-Representación simplificada de fuerza aplicada sobre un vano del nitroducto

6.3.5.1.- En operación

Cargas a considerar:

Peso propio de la tubería: $42,6 \text{ kg/m}$

Peso de nieve en tubería: $30,58 \text{ kg/m}^2$ (obtenida de la ecuación (6.17))

Esfuerzo del viento: $84,81 \text{ kg/m}^2$ (obtenida de la ecuación (6.15))

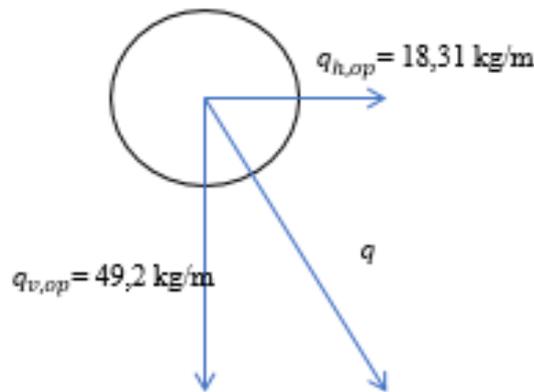


Figura 6.2.-Representación fuerzas internas de tubería en operación

Carga vertical:

$$q_{v,op} = 42,6 \frac{kg}{m} + 30,58 \frac{kg}{m^2} \cdot 0,2159 m = 49,2 \frac{kg}{m}$$

Carga horizontal:

$$q_{h,op} = 84,81 \frac{kg}{m^2} \cdot 0,2159 m = 18,31 \frac{kg}{m}$$

6.3.5.1.1.- Tensiones longitudinales

$$q_{op} = \sqrt{q_{v,op}^2 + q_{h,op}^2} = \sqrt{49,2^2 + 18,31^2} =$$

$$q_{op} = 52,5 \frac{kg}{m}$$

Momento máximo:

$$M_{f,op} = \frac{q_{op} \cdot l^2}{10} = \frac{52,5 \cdot 8^2}{10} = 336 kg \cdot m$$

Tensión por peso propio + viento:

$$\sigma_{f,l,op} = \frac{M_{f,op}}{R \cdot E_L} = \frac{336 kg \cdot m}{156495,9994 mm^3 \cdot \frac{1 m^3}{10^9 mm^3} \cdot 0,7} = 3067171,06 \frac{kg}{m^2} \rightarrow 30,09 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión por presión interna:

$$\sigma_{p,l,op} = \frac{PS \cdot \left(\frac{D_{oi}}{2} - 0,4 \cdot t \right)}{2 \cdot E_L \cdot t} = \frac{25 MPa \cdot \left(\frac{206,79}{2} mm - 0,4 \cdot 4,56 \right)}{2 \cdot 0,7 \cdot 4,56 mm} = 39,77 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión longitudinal:

$$\sigma_{l,op} = \sigma_{f,l,op} + \sigma_{p,l,op} = 30,09 + 39,77 = 69,86 MPa$$



6.3.5.1.2.- Tensiones transversales

Tensión de cortadura por peso propio + viento:

$$\sigma_{f,t,op} = \frac{q_{op} \cdot l}{A \cdot E_C} = \frac{52,5 \frac{kg}{m} \cdot 8 m}{3024,337 mm^2 \cdot \frac{1 m^2}{10^6 mm^2} \cdot 1} = 138873,4126 \frac{kg}{m^2} \rightarrow 1,36 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión por presión interna:

$$\sigma_{p,t,op} = \frac{PS \cdot \left(\frac{D_{oi}}{2} - 0,4 \cdot t\right)}{E_C \cdot t} = \frac{25 MPa \cdot \left(\frac{206,79}{2} mm - 0,4 \cdot 4,56\right)}{1 \cdot 4,56 mm} = 55,68 \frac{N}{mm^2}$$

6.3.5.1.3.- Tensión combinada (tensión máxima)

$$\sigma_{máx,op} = \frac{1}{2} \left(\sigma_{l,op} + \sigma_{p,t,op} + \sqrt{4 \cdot \sigma_{f,t,op}^2 + (\sigma_{l,op} - \sigma_{p,t,op})^2} \right) = 69,9 MPa$$

Como tensión de comparación "S_{ADM}" para el material se considerará dos tercios del límite elástico.

$$S_{ADM} = \frac{2}{3} \cdot S_y = \frac{2}{3} \cdot 240 \frac{N}{mm^2} = 160 \frac{N}{mm^2}$$

Como $\sigma_{máx,op} < S_{ADM} \rightarrow$ CORRECTO

6.3.5.2.- En prueba hidrostática

Cargas a considerar:

Peso propio de la tubería: 42,6 kg/m

Peso del agua contenida en tubería: 32,94 kg/m²

$$P_{agua} = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \cdot \rho_{agua} = \frac{\pi \cdot 204,79^2}{4} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1 m^2}{10^6 mm^2} = 32,94 \frac{kg}{m}$$

Esfuerzo del viento: 84,81 kg/m² (obtenida de la ecuación (6.15))

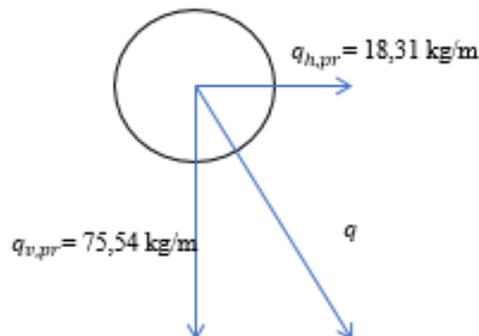


Figura 6.3.-Representación fuerzas internas de tubería en prueba hidrostática

Carga vertical:



$$q_{v,pr} = 42,6 \frac{kg}{m} + 32,94 \frac{kg}{m} = 75,54 \frac{kg}{m}$$

Carga horizontal:

$$q_{h,pr} = 84,81 \frac{kg}{m^2} \cdot 0,2159 m = 18,31 \frac{kg}{m}$$

6.3.5.2.1.- Tensiones longitudinales

$$q_{pr} = \sqrt{q_{v,pr}^2 + q_{h,pr}^2} = \sqrt{75,54^2 + 18,31^2} =$$

$$q_{pr} = 77,73 \frac{kg}{m}$$

Momento máximo:

$$M_{fpr} = \frac{f_{pr} \cdot l^2}{10} = \frac{77,73 \cdot 8^2}{10} = 497,472 kg \cdot m$$

Tensión por peso propio + agua + viento:

$$\sigma_{f,l,pr} = \frac{M_{fpr}}{R \cdot E_L} = \frac{497,472 kg \cdot m}{156495,9994 mm^3 \cdot \frac{1 m^3}{10^9 mm^3} \cdot 0,7} = 4541165,84 \frac{kg}{m^2} \rightarrow 44,55 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión por presión interna:

$$\sigma_{p,l,pr} = \frac{P_p \cdot \left(\frac{D_{oi}}{2} - 0,4 \cdot t\right)}{2 \cdot E_L \cdot t} = \frac{37,5 MPa \cdot \left(\frac{206,79}{2} mm - 0,4 \cdot 4,56\right)}{2 \cdot 0,7 \cdot 4,56 mm} = 59,66 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión longitudinal:

$$\sigma_{l,pr} = \sigma_{f,l,pr} + \sigma_{p,l,pr} = 44,55 + 59,66 = 104,21 MPa$$

6.3.5.2.2.- Tensiones transversales

Tensión de cortadura por peso propio + viento:

$$\sigma_{f,t,pr} = \frac{q_{pr} \cdot l}{A \cdot E_C} = \frac{77,73 \frac{kg}{m} \cdot 8 m}{3024,337 mm^2 \cdot \frac{1 m^2}{10^6 mm^2} \cdot 1} = 205612 \frac{kg}{m^2} \rightarrow 2,017 \frac{N}{mm^2}$$

Tensión por presión interna:

$$\sigma_{p,t,pr} = \frac{P_p \cdot \left(\frac{D_{oi}}{2} - 0,4 \cdot t\right)}{E_L \cdot t} = \frac{37,5 MPa \cdot \left(\frac{206,79}{2} mm - 0,4 \cdot 4,56\right)}{1 \cdot 4,56 mm} = 83,52 \frac{N}{mm^2}$$



6.3.5.2.3.- Tensión combinada (tensión máxima)

$$\sigma_{m\acute{a}x,pr} = \frac{1}{2} \left(\sigma_{l,pr} + \sigma_{p,t,pr} + \sqrt{4 \cdot \sigma_{f,t,pr}^2 + (\sigma_{l,pr} - \sigma_{p,t,pr})^2} \right) = 104,4 \text{ MPa}$$

Como tensión de comparación "S_{ADM}" para el material en condición de prueba, el código ASME toma 0,9 veces el límite elástico.

$$S_{ADM} = 0,9 \cdot S_y = 0,9 \cdot 240 \frac{N}{mm^2} = 216 \frac{N}{mm^2}$$

Como $\sigma_{m\acute{a}x,pr} < S_{ADM} \rightarrow$ CORRECTO

6.3.5.3.- Flechas máximas

6.3.5.3.1.- En operación

$$f_{m\acute{a}x,op} = \frac{q_{op} \cdot l^4}{384 \cdot E_M \cdot I} = \frac{52,5 \frac{kg}{m} \cdot \frac{9,81N}{kg} \cdot 8^4 m^4}{384 \cdot 2,05 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} \cdot 16893743,13 \text{ mm}^4 \cdot \frac{1m^4}{10^{12} mm^4}}$$

$$f_{m\acute{a}x,op} = 0,001586 \text{ m}$$

Como $f_{m\acute{a}x,op} < f_{ADM,op}$ (ecuación (6.5) \rightarrow CORRECTO

6.3.5.3.2.- En prueba hidrostática

$$f_{m\acute{a}x,pr} = \frac{q_{op} \cdot l^4}{384 \cdot E_M \cdot I} = \frac{77,73 \frac{kg}{m} \cdot \frac{9,81N}{kg} \cdot 8^4 m^4}{384 \cdot 2,05 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} \cdot 16893743,13 \text{ mm}^4 \cdot \frac{1m^4}{10^{12} mm^4}}$$

$$f_{m\acute{a}x,pr} = 0,00235 \text{ m}$$

Como $f_{m\acute{a}x,pr} < f_{ADM,pr}$ (ecuación (6.6) \rightarrow CORRECTO

6.3.6.- Cálculo flexibilidad

Se comprobará si la tubería a instalar se puede considerar autoflexible con los tramos que presenta, se realiza por el criterio empírico de flexibilidad ASME B31.3.

El plano que representa el tramo de nitroducto a comprobar es el plano n°15 "NG2A-003" del documento "Planos".

Para saber si es autoflexible debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\frac{D_e \cdot \Delta L}{(L - U)^2} \leq K_1 = 208,328 \left(\frac{mm}{m} \right)^2$$

Siendo:

- D_e: diámetro exterior de la tubería



- ΔL : incremento de longitud de tramo entre apoyos fijos en mm
- L_i : longitud de cada tramo en mm
- L : longitud desarrollada del tramo entre apoyos fijos en m
- U : distancia en línea recta entre apoyos fijos en m
- α : coeficiente de dilatación del material
- ΔT : incremento de temperatura

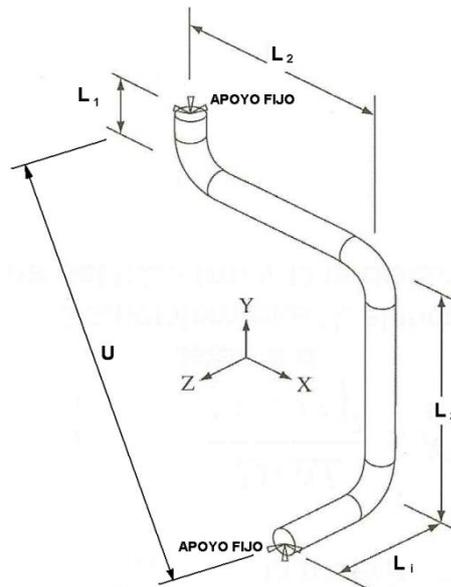


Figura 6.4.-Esquema cálculo de flexibilidad

De la disposición geométrica de conexiones y apoyos prevista en el plano n°15”NG2A-003” tenemos:

$$\Sigma L_x = 43,63 \text{ m}$$

$$\Sigma L_y = 2,91 \text{ m}$$

$$\Sigma L_z = 65,43 \text{ m}$$

$$L = \Sigma L_i = 111,97 \text{ m}$$

$$U = \sqrt{\Sigma L_x^2 + \Sigma L_y^2 + \Sigma L_z^2} = 78,7 \text{ m}$$

$$\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T = 80^\circ \text{ (de } -20^\circ\text{C a } 60^\circ\text{C)}$$

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T = 107,49 \text{ mm}$$

$$\frac{219,1 \cdot 107,49}{(111,97 - 78,7)^2} = 21,27 \leq K_1 = 208,328 \left(\frac{\text{mm}}{\text{m}}\right)^2 \rightarrow \text{AUTOFLEXIBLE}$$



Al tratarse de un sistema autoflexible se debe realizar un diseño basado en peso, por lo tanto, se debe garantizar que los apoyos de la tubería permitan un desplazamiento elástico si es necesario.

6.3.7.- Cálculo de bridas

Se comprobarán por ASME B16.5-2013 Clase #300 (bridas que trabajan a media presión):

Según los estándares de Praxair las bridas serán:

- Calidad: SA-105
- Grupo: 1.1 (Tabla 1A)

De la tabla 2-1.1 de la norma obtenemos:

| Clase de temp (°C) | Presión de trabajo (barg) |
|--------------------|---------------------------|
| 50 | 50,1 |
| 100 | 46,6 |

Sabiendo que la temperatura de diseño es $TS=60^{\circ}\text{C}$, se obtendrá el valor correspondiente a la máxima presión admisible a la que podrá estar sometido:

$$P_{m\acute{a}x,ADM} = 50,1 - \frac{(60 - 50)}{\left(\frac{(100 - 50)}{(50,1 - 46,6)}\right)} = 49,4 \text{ barg}$$

Como $PS = 25 \text{ barg} < P_{m\acute{a}x,ADM} \rightarrow \text{LAS BRIDAS SON ADECUADAS}$

Se debe garantizar que los apoyos de la tubería permitan un desplazamiento elástico si es necesario.

6.4.- CÁLCULO DE SOPORTES

El cálculo de los soportes, número y localización se realizará según la norma ASME B31.3. Al tratarse de un sistema autoflexible, se realizará un diseño basado en peso.

La tubería compartirá los soportes con otras tres tuberías en ciertas partes del recorrido, todas ellas transportan gas y el menor diámetro nominal es de 8", por lo tanto, el diseño basado en peso se hará para dicho DN y el tipo de fluido que transporta (gas) y según la norma se recomienda tomar como máxima separación entre soportes una longitud de $L_s=7,3$ m., tal y como indica la siguiente ilustración:



| Nominal Pipe Diameter (mm) Sch ST | Suggested máximo span, L_s | |
|--|---------------------------------|------------|
| | Fluid (m) | Gas (m) |
| 25 / 1" | 2.1 | 2.7 |
| 50 / 2" | 3.0 | 4.0 |
| 75 / 3" | 3.7 | 4.6 |
| 100 / 4" | 4.3 | 5.2 |
| 150 / 6" | 5.2 | 6.4 |
| 200 / 8" | 5.8 | 7.3 |
| 300 / 12" | 7.0 | 9.1 |
| 400 / 16" | 8.2 | 10.7 |
| 500 / 20" | 9.1 | 11.9 |
| 600 / 24" | 9.8 | 12.8 |

Figura 6.5.- Distancia máxima de separación entre puntos fijos.

Para obtener cada separación se utilizará la siguiente gráfica:

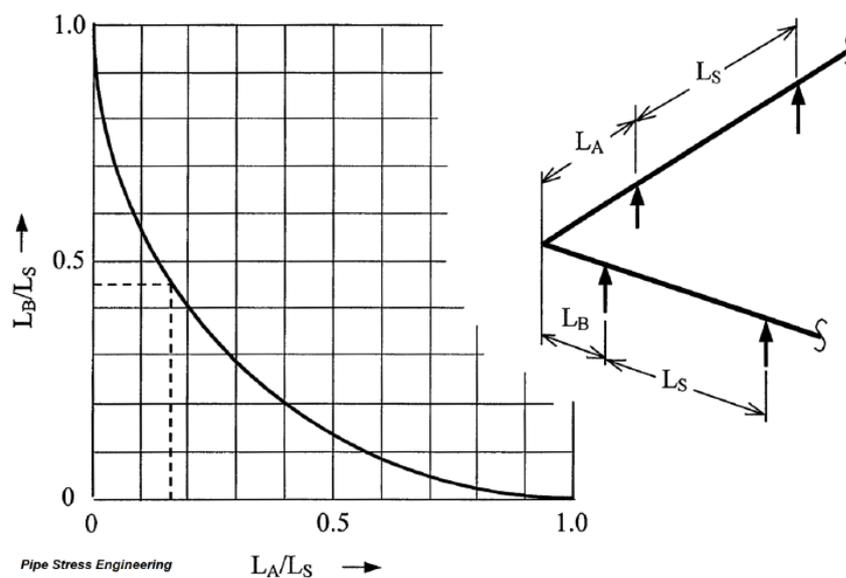


Figura 6.6.- Gráfica separación puntos fijos.

La división del recorrido se hará en los tramos rectos:



$$L_A = 42 - 36,75 = 5,25 \text{ m}$$

$$\frac{L_A}{L_S} = 0,72 \rightarrow \frac{L_B}{L_S} = 0,045 \rightarrow L_B = 0,32 \text{ m}$$

Se instalaría por tanto un soporte a 0'32 metros de D (punto de la Figura 6.7), el cual ya se encuentra instalado a esa distancia.

6.4.1.3.- Tramo 3

A partir del soporte anterior se instalará cada soporte a una distancia inferior o igual 7,3 metros: 7'32, 14'32 y 21'32 metros de D (punto de la Figura 6.7).

$$L_A = 23 - 21,32 = 1,68 \text{ m}$$

$$\frac{L_A}{L_S} = 0,23 \rightarrow \frac{L_B}{L_S} = 0,37 \rightarrow L_B = 2,70 \text{ m}$$

Se instalaría por tanto un soporte a 1'6 metros de F (punto de la Figura 6.7), el cual ya se encuentra instalado a esa distancia.

6.4.1.4.- Tramo 4

Además del soporte anterior, se instala otro soporte de 8'9 metros de F (punto de la Figura 6.7). En el tramo restante no se instalan más soportes debido a que las tuberías pasan a estar apoyadas sobre el soporte creado para acceder a la zona del medidor M9.

6.4.2.- Esfuerzos soportes

Se calculará para el caso más desfavorable en cada tramo, que se corresponde con la mayor separación entre soportes, y del número de tuberías que soporta más la acción de viento.

Datos:

Coefficiente de rozamiento acero/acero: 0,3

Viento sobre soportes: 127,127 kg/m² (obtenida de la ecuación (6.13))

Viento sobre tuberías: 84,81 kg/m² (obtenida de la ecuación (6.15))

| DN (mm) | Peso tubo (kg/m) | Diámetro ext. (mm) |
|---------|------------------|--------------------|
| 350 | 81,25 | 355,6 |
| 300 | 73,78 | 323,8 |
| 250 | 60,29 | 273 |
| 200 | 42,55 | 219,1 |

Tabla 6.2.-Pesos y diámetro exterior de tuberías sobre los soportes



6.4.2.1.- TRAMO 1

En el tramo 1, además del nitroducto a instalar, los soportes existentes sostienen actualmente 3 tuberías: un oxiducto (tuberías que transportan oxígeno) de 14", y dos nitroductos, el actual de descarga de 8" y el que se dirige a Gijón II de 10". La distribución de las tuberías sobre los soportes en este tramo se puede observar en la siguiente Figura 6.8.- Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 1 Figura 6.8.

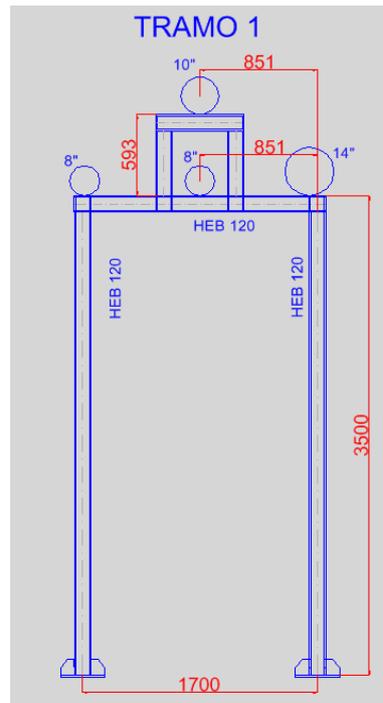


Figura 6.8.-Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 1

Se considera como una estructura hiperestática aporticada con una altura de soporte de $h=3'5$ metros, una separación entre patas de $s=1'7$ metros y una longitud máxima de $l=6'617$ metros que actuará sobre un soporte.

La estructura estará formada por dos pilares y un dintel de perfil metálico HEB 120, de acero S-275 y cuyo peso longitudinal es de: 26,7 kg/m.

$$\text{Peso soporte: } P_s = 26,7 \cdot (2 \cdot h + s) = 232,29 \text{ kg}$$

Esfuerzo horizontal por rozamiento:

$$F_R = 42,55 \cdot l \cdot 2 + 60,29 \cdot l + 81,25 \cdot l = 1499,67 \text{ kg}$$

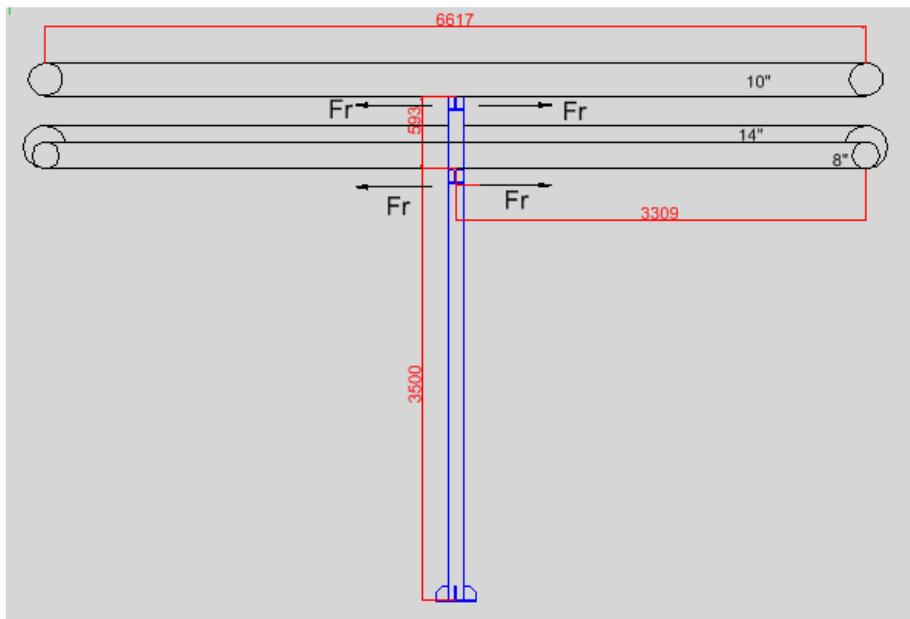


Figura 6.9.-Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 1
Esfuerzo horizontal por viento:

Para este caso la fuerza del viento actuará de forma más acentuada sobre la tubería de mayor diámetro, que es el caso del oxiducto de 14", pero como se encuentra una tubería de 10" a una altura mayor que la de 14", la fuerza del viento actúa sobre ambas. Y para el caso del soporte se tiene en cuenta un lateral del mismo.

Sobre tubería:

$$H1 = (0,3556 + 0,273) \cdot 84,81 \cdot l = 352,76 \text{ kg}$$

Sobre soporte:

$$H2 = 127,127 \cdot h \cdot 0,12 = 53,39 \text{ kg}$$

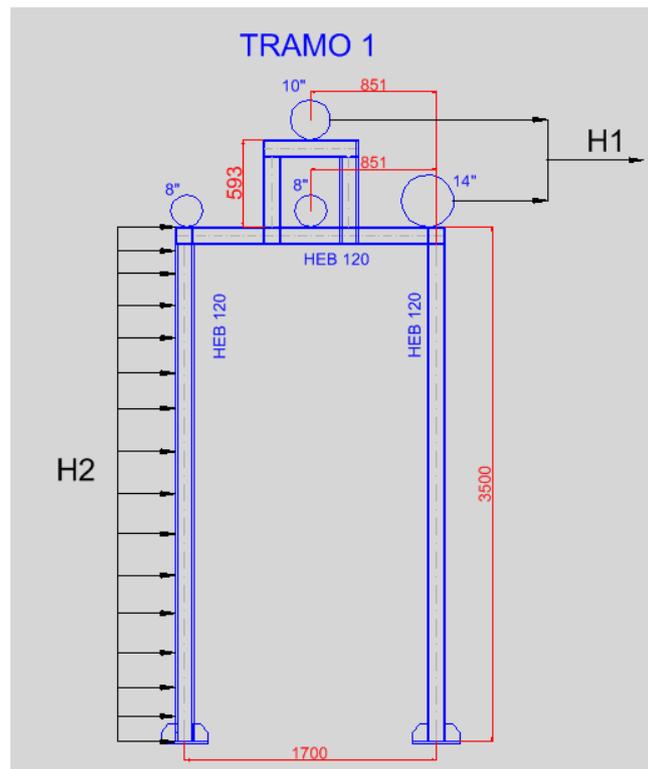


Figura 6.10.-Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 1

Inercias:

- Dintel $I_d = 864,4 \text{ cm}^4$
- Pilar $I_p = 864,4 \text{ cm}^4$

$$k = \frac{I_d}{I_p} \cdot \frac{h}{l} = \frac{864,4}{864,4} \cdot \frac{3,5}{1,7} = 2,0588$$

Reacciones:

Para H1:

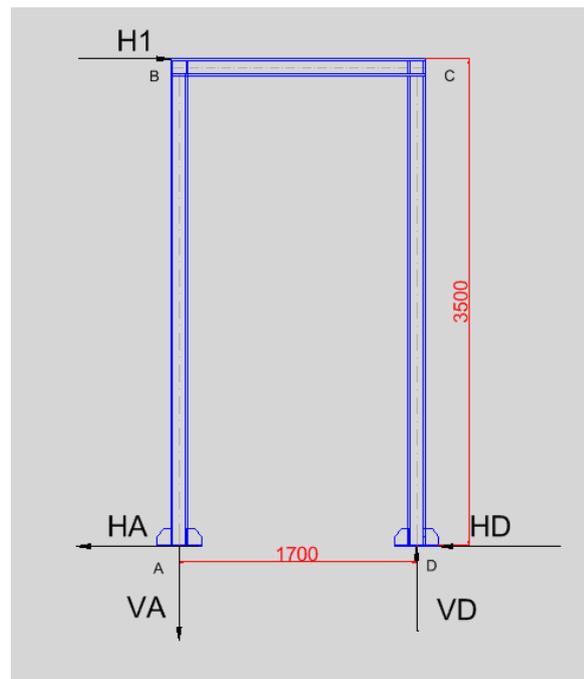


Figura 6.11.-Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 1

$$V_{D,1} = V_{A,1} = \frac{3 \cdot H1 \cdot h \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 335,94 \text{ kg}$$

$$H_{A,1} = H_{D,1} = \frac{H1}{2} = 176,38 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,1} = -\frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = -331,78 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,1} = -M_{C,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k}{6 \cdot k + 1} = 285,55 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = 331,78 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Para H2:

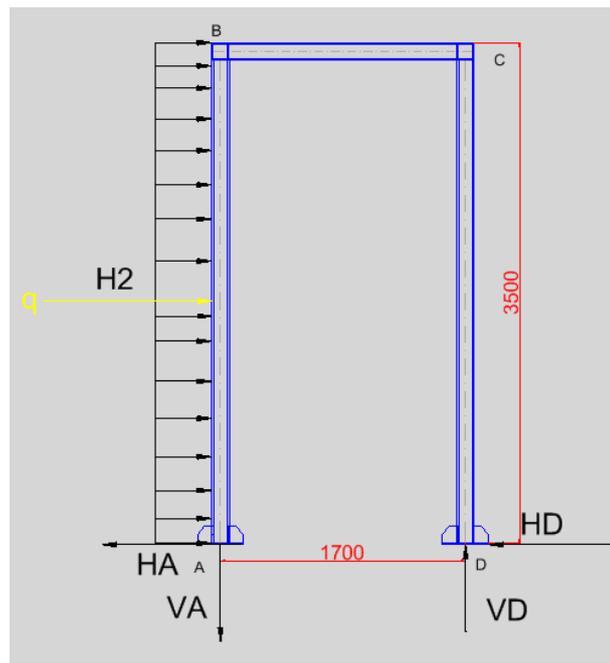


Figura 6.12.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre soporte

$$q = \frac{H2}{h}$$

$$V_{A,2} = V_{D,2} = \frac{q \cdot h^2 \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 16,94 \text{ kg}$$

$$H_{D,2} = \frac{q \cdot h \cdot (2 \cdot k + 3)}{8 \cdot (k + 2)} = 11,70 \text{ kg}$$

$$H_{A,2} = q \cdot h - H_D = 41,68 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(5 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{1}{k + 2}\right) = -42,01 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(1 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{2}{k + 2}\right) = 10,45 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{C,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{2}{k + 2}\right) = -18,35 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{1}{k + 2}\right) = 22,60 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momentos máximos debido a H1 y H2:

$$M_A = M_{A,1} + M_{A,2} = -373,80 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_B = M_{B,1} + M_{B,2} = 296,00 \text{ kg} \cdot \text{m}$$



$$M_C = M_{C,1} + M_{C,2} = -303,90 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_D = M_{D,1} + M_{D,2} = 354,39 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, $M_{\text{máx}}$ sería:

$$M_{\text{máx}} = |M_A| = 373,80 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momento máximo debido a F_R :

$$M_{FR} = \frac{F_R \cdot h}{2} = 2624,43 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Carga vertical máxima sobre una pata:

$$V = V_{D,1} + V_{D,2} + \frac{P_s}{2} + \left(84,81 + \frac{60,29}{2} + \frac{42,55}{2}\right) \cdot l = 1346,91 \text{ kg}$$

Al tener perfiles HEB120:

- Área: $A = 34,01 \text{ cm}^2$
- I_y : 5,04 cm
- W_y : 144,1 cm³
- W_x : 52,92 cm³
- Límite elástico: $S_{ADM} = 275 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{W_y} + \frac{M_{\text{máx}} \cdot 100}{W_x} = 2567,21 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 215,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Como $\sigma_{\text{máx}} < S_{ADM} \rightarrow \text{CORRECTO}$

PERNOS DE ANCLAJE

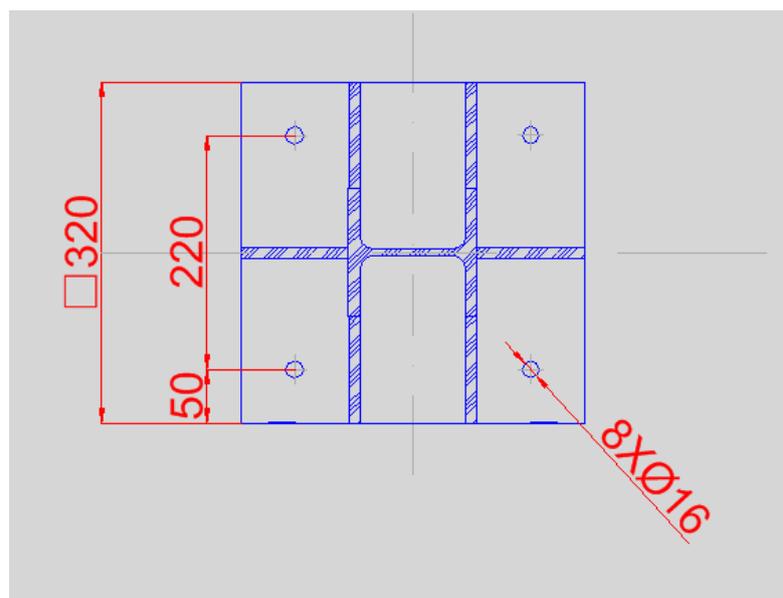


Figura 6.13.-Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 1



Esfuerzo a tracción:

$$T = \frac{M_{m\acute{a}x}}{22 \cdot 2} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{22 \cdot 2} = 6814,17 \text{ kg}$$

Esfuerzo rasante por perno:

$$E_R = \sqrt{\frac{F_R^2 + (H1 + H2)^2}{8}} = 549,31 \text{ kg}$$

Carga vertical sobre la pata que más soporta:

- Peso tubería DN 350: $81,25 \cdot l = 537,63 \text{ kg}$
- Peso tubería DN 250: $60,29 \cdot \frac{l}{2} = 199,46 \text{ kg}$
- Peso tubería DN 200: $42,55 \cdot \frac{l}{2} = 140,77 \text{ kg}$
- Peso soporte: $\frac{P_s}{2} = 116,14 \text{ kg}$

$$C = 537,63125 + 199,469465 + 140,776675 + 116,145 = 994,02 \text{ kg}$$

Esfuerzo de tracción por perno:

$$T_1 = T - \frac{C}{4} = 6565,66 \text{ kg}$$

Pernos M16 de grado 8,8:

- $A_p = 1,57 \text{ cm}^2$
- Límite elástico $S_Y = 640 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_T = \frac{T_1}{A_p} + \frac{E_R}{A_p} = 4531,83 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 444,57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_T < S_Y \rightarrow \text{CORRECTO}$$

Fatiga en el hormigón:

$$R_x = R_y = \frac{60^3}{6} = 36000 \text{ cm}^3$$

$$A = 60^2 = 3600 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_H = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{R_x} + \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot 100}{R_x} = 8,70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

6.4.2.2.- TRAMO 2

En el tramo 2, además del nitroducto a instalar, los soportes existentes sostienen actualmente 4 tuberías: dos oxiductos (tuberías que transportan oxígeno) de 8" y de 14", y dos nitroductos, el actual de descarga de 8" y el que se dirige a Gijón II de 10". La distribución de las tuberías sobre los soportes en este tramo se puede observar en la siguiente Figura 6.14.

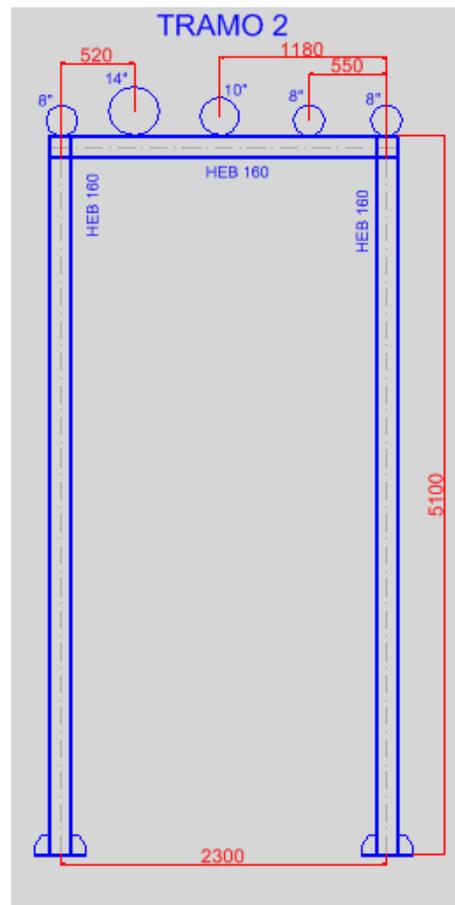


Figura 6.14.- Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 2

Se considera como una estructura hiperestática apoyada con una altura de soporte de $h=5'1$ metros, una separación entre patas de $s=2'3$ metros y una longitud máxima $l=7'3$ metros que actuará sobre un soporte.

La estructura estará formada por dos pilares y un dintel de perfil metálico HEB 160, de acero S-275 y cuyo peso longitudinal es de: 42,6 kg/m.

$$\text{Peso soporte: } P_s = 42,6 \cdot (2 \cdot h + s) = 532,5 \text{ kg}$$

Esfuerzo horizontal por rozamiento:

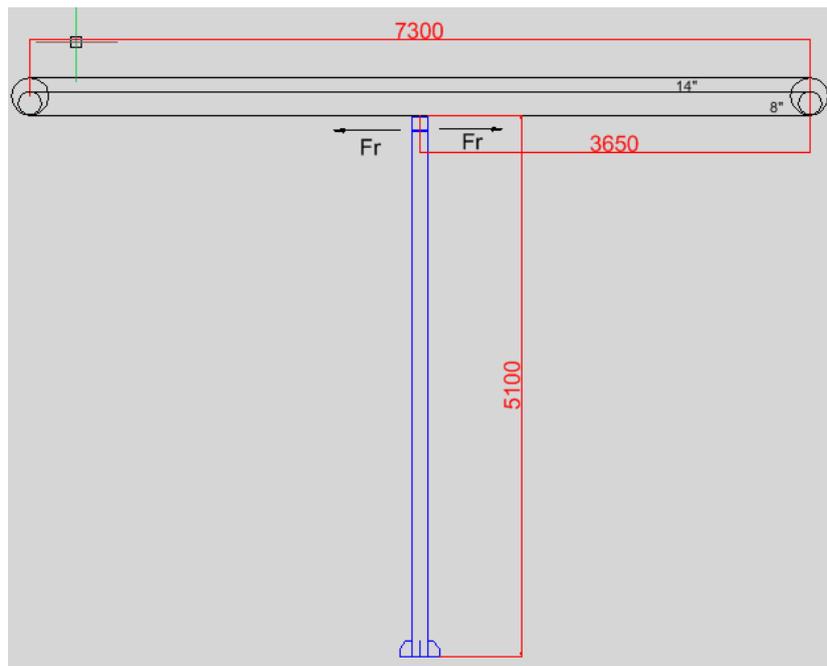


Figura 6.15.- Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 2

$$F_R = 42,55 \cdot l \cdot 2 + 60,29 \cdot l + 81,25 \cdot l = 1965,08 \text{ kg}$$

Esfuerzo horizontal por viento:

Para este caso la fuerza del viento actuará de forma más acentuada sobre la tubería de mayor diámetro, que es el caso del oxiducto de 14". Y para el caso del soporte se tiene en cuenta un lateral del mismo.

Sobre tubería:

$$H1 = 0,3556 \cdot 84,81 \cdot l = 220,15 \text{ kg}$$

Sobre soporte:

$$H2 = 127,127 \cdot h \cdot 0,16 = 103,73 \text{ kg}$$

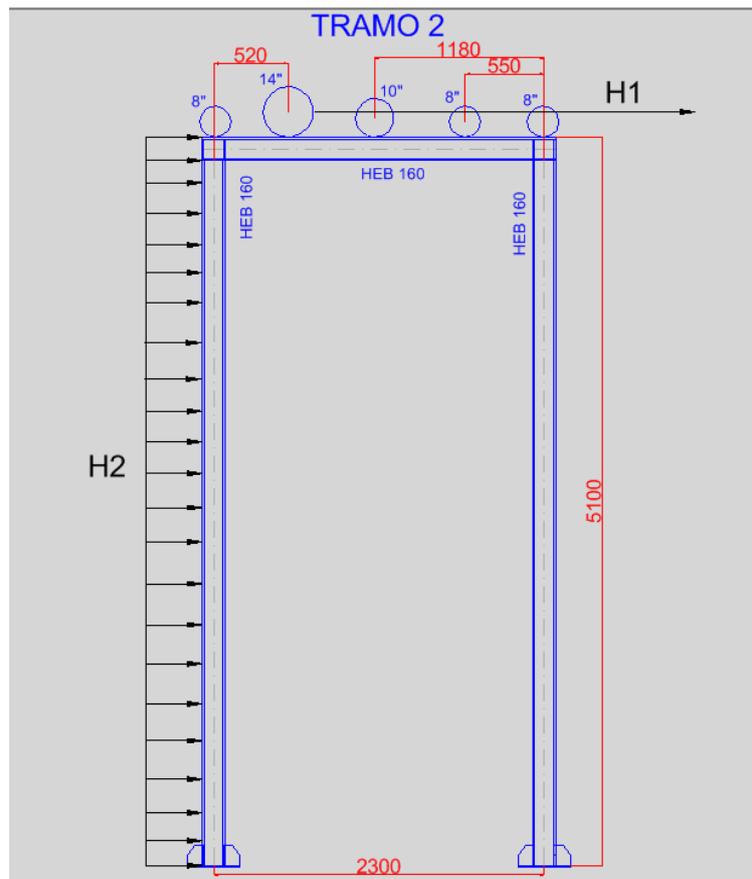


Figura 6.16.- Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 2

Inercias:

- Dintel $I_d = 2492 \text{ cm}^4$
- Pilar $I_p = 2492 \text{ cm}^4$

$$k = \frac{I_d}{I_p} \cdot \frac{h}{l} = \frac{864,4}{864,4} \cdot \frac{5,1}{2,3} = 2,21$$

Reacciones:

Para H1:

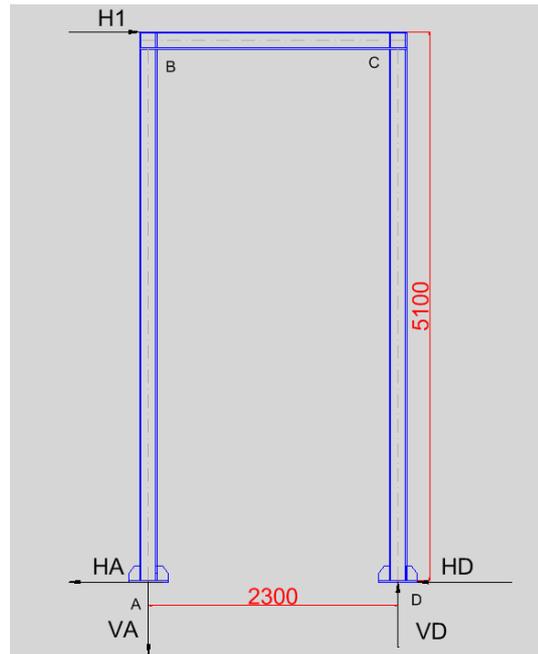


Figura 6.17.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 2

$$V_{D,1} = V_{A,1} = \frac{3 \cdot H1 \cdot h \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 227,02 \text{ kg}$$

$$H_{A,1} = H_{D,1} = \frac{H1}{2} = 110,07 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,1} = -\frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = -300,32 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,1} = -M_{C,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k}{6 \cdot k + 1} = 261,07 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = 300,32 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Para H2:

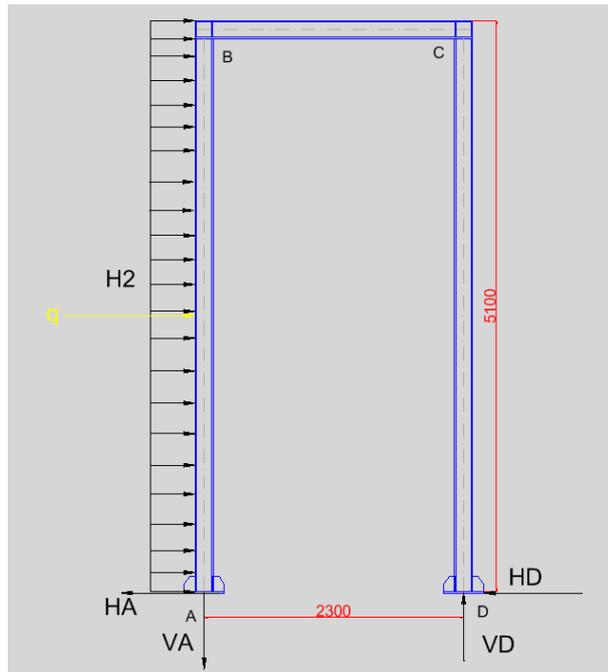


Figura 6.18.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre soporte del tramo 2

$$q = \frac{H2}{h}$$

$$V_{A,2} = V_{D,2} = \frac{q \cdot h^2 \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 35,65 \text{ kg}$$

$$H_{D,2} = \frac{q \cdot h \cdot (2 \cdot k + 3)}{8 \cdot (k + 2)} = 80,87 \text{ kg}$$

$$H_{A,2} = q \cdot h - H_D = 22,85 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(5 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{1}{k + 2} \right) = -118,52 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(1 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{2}{k + 2} \right) = 29,41 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{C,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{2}{k + 2} \right) = -52,59 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{1}{k + 2} \right) = 63,98 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momentos máximos debido a H1 y H2:

$$M_A = M_{A,1} + M_{A,2} = -418,85 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_B = M_{B,1} + M_{B,2} = 290,49 \text{ kg} \cdot \text{m}$$



$$M_C = M_{C,1} + M_{C,2} = -313,67 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_D = M_{D,1} + M_{D,2} = 364,30 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, $M_{\text{máx}}$ sería:

$$M_{\text{máx}} = |M_A| = -418,85 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momento máximo debido a F_R :

$$M_{FR} = \frac{F_R \cdot h}{2} = 5010,97 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Carga vertical máxima sobre una pata:

$$V = V_{D,1} + V_{D,2} + \frac{P_s}{2} + \left(84,81 + \frac{60,29}{2} + 42,55\right) \cdot l = 1652,55 \text{ kg}$$

Al tener perfiles HEB160:

- Área: $A = 54,25 \text{ cm}^2$
- I_y : 6,78 cm
- W_y : 311,5 cm^3
- W_x : 111,2 cm^3
- Límite elástico: $S_{ADM} = 275 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{W_y} + \frac{M_{\text{máx}} \cdot 100}{W_x} = 2015,78 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 197,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Como $\sigma_{\text{máx}} < S_{ADM} \rightarrow \text{CORRECTO}$

PERNOS DE ANCLAJE

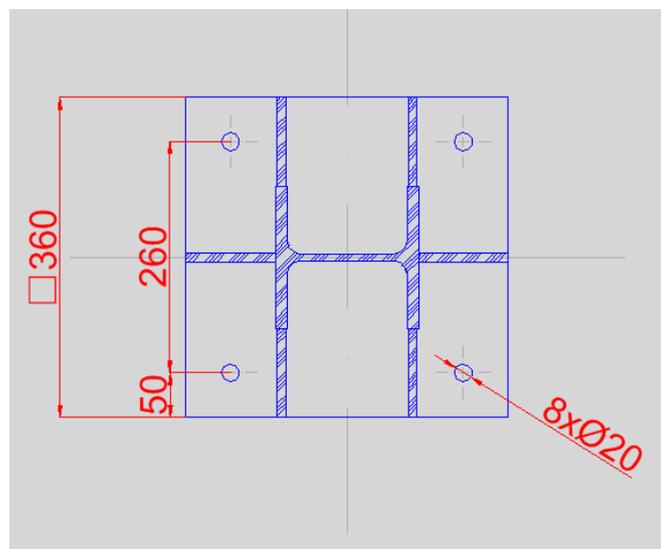


Figura 6.19.-Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 2



Esfuerzo a tracción:

$$T = \frac{M_{m\acute{a}x}}{26 \cdot 2} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{26 \cdot 2} = 10441,96 \text{ kg}$$

Esfuerzo rasante por perno:

$$E_R = \sqrt{\frac{F_R^2 + (H1 + H2)^2}{8}} = 704,13 \text{ kg}$$

Carga vertical sobre la pata que más soporta:

- Peso tubería DN 350: $81,25 \cdot l = 593,12 \text{ kg}$
- Peso tubería DN 250: $60,29 \cdot \frac{l}{2} = 220,05 \text{ kg}$
- Peso tubería DN 200: $42,55 \cdot l = 310,61 \text{ kg}$
- Peso soporte: $\frac{P_s}{2} = 266,25 \text{ kg}$

$$C = 593,125 + 220,0585 + 310,615 + 266,25 = 1390,04 \text{ kg}$$

Esfuerzo de tracción por perno:

$$T_1 = T - \frac{C}{4} = 10094,45 \text{ kg}$$

Pernos M20 de grado 8,8:

- $A_p = 2,45 \text{ cm}^2$
- Límite elástico $S_Y = 640 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_T = \frac{T_1}{A_p} + \frac{E_R}{A_p} = 4407,588696 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 432,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_T < S_Y \rightarrow \text{CORRECTO}$$

Fatiga en el hormigón:

$$R_x = R_y = \frac{70^3}{6} = 57166,66 \text{ cm}^3$$

$$A = 70^2 = 4900 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_H = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{R_x} + \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot 100}{R_x} = 9,83 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

6.4.2.3.- TRAMO 3

En el tramo 3, además del nitroducto a instalar, los soportes existentes sostienen actualmente 2 tuberías: un oxiducto (tuberías que transportan oxígeno) de 14", y un nitroducto, el actual de descarga de 8". La distribución de las tuberías sobre los soportes en este tramo se puede observar en la siguiente

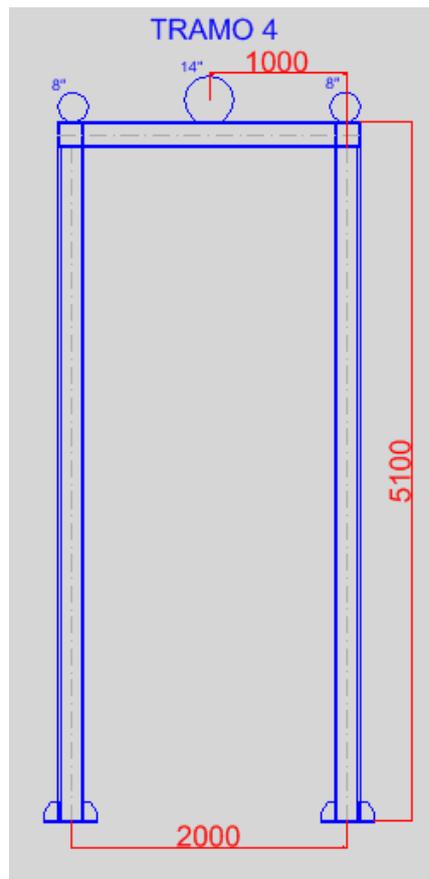


Figura 6.20.-Distribución de tuberías sobre los soportes del tramo 3

Se considera como una estructura hiperestática aporricada con una altura de soporte de $h=5'1$ metros, una separación entre patas de $s=2$ metros y una longitud máxima de $l=7$ metros que actuará sobre un soporte.

La estructura estará formada por dos pilares y un dintel de perfil metálico HEB 180, cuyo peso longitudinal es de: 51,2 kg/m.

$$\text{Peso soporte: } P_s = 51,2 \cdot (2 \cdot h + s) = 624,64 \text{ kg}$$

Esfuerzo horizontal por rozamiento:

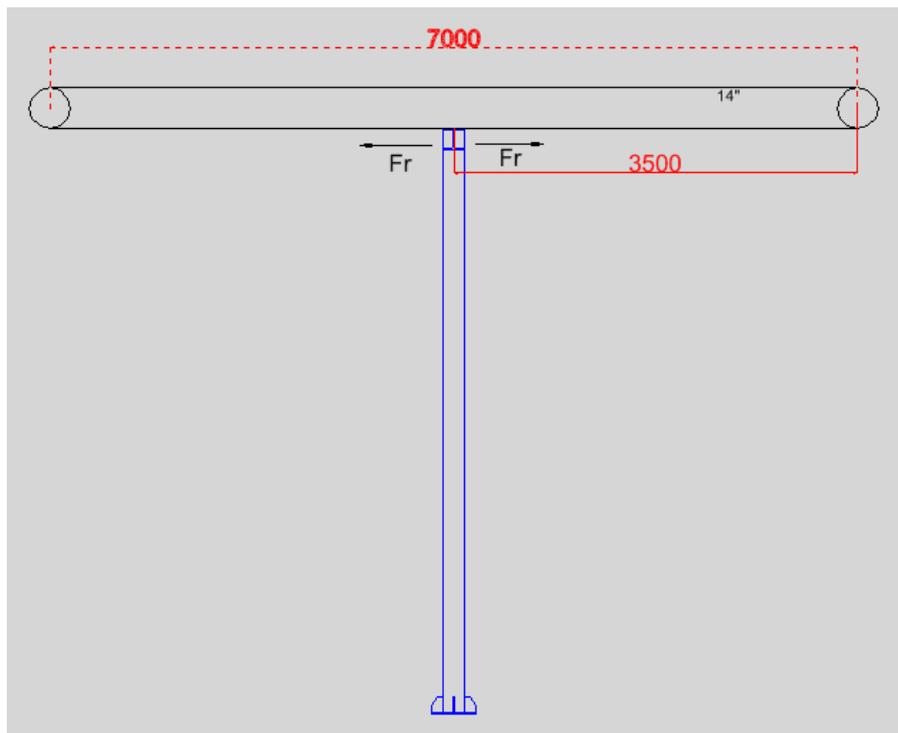


Figura 6.21.- Representación de fuerzas de rozamiento de tuberías sobre soportes del tramo 3

$$F_R = 42,55 \cdot l \cdot 2 + 60,29 \cdot l + 81,25 \cdot l = 1085,21 \text{ kg}$$

Esfuerzo horizontal por viento:

Sobre tubería:

$$H1 = 0,3556 \cdot 84,81 \cdot l = 211,10 \text{ kg}$$

$$H2 = 127,127 \cdot h \cdot 0,18 = 116,70 \text{ kg}$$

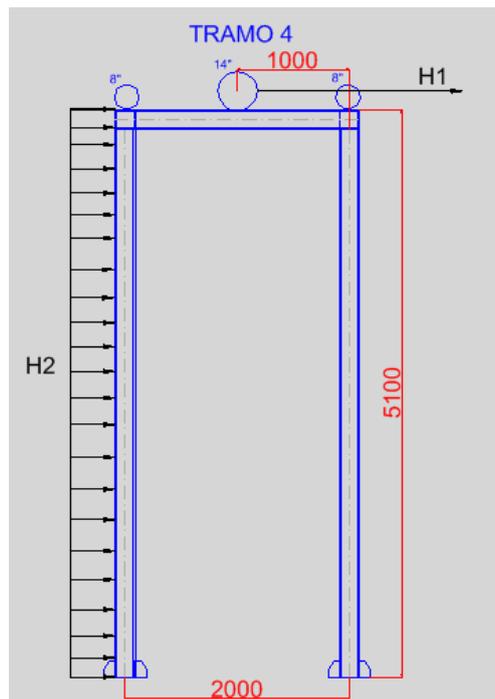


Figura 6.22.- Representación fuerzas del viento sobre soportes y tuberías del tramo 3

Inercias:

- Dintel $I_d = 3831 \text{ cm}^4$
- Pilar $I_p = 3831 \text{ cm}^4$

$$k = \frac{I_d}{I_p} \cdot \frac{h}{l} = \frac{864,4}{864,4} \cdot \frac{5,1}{2} = 2,55$$

Reacciones:

Para H1:

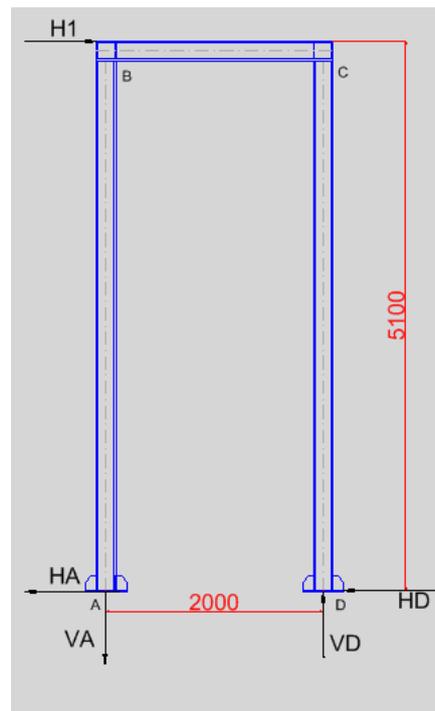


Figura 6.23.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 3

$$V_{D,1} = V_{A,1} = \frac{3 \cdot H1 \cdot h \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 252,65 \text{ kg}$$

$$H_{A,1} = H_{D,1} = \frac{H1}{2} = 105,55 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,1} = -\frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = -285,67 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,1} = -M_{C,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k}{6 \cdot k + 1} = 252,65 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,1} = \frac{H1 \cdot h}{2} \cdot \frac{3 \cdot k + 1}{6 \cdot k + 1} = 285,67 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Para H2:

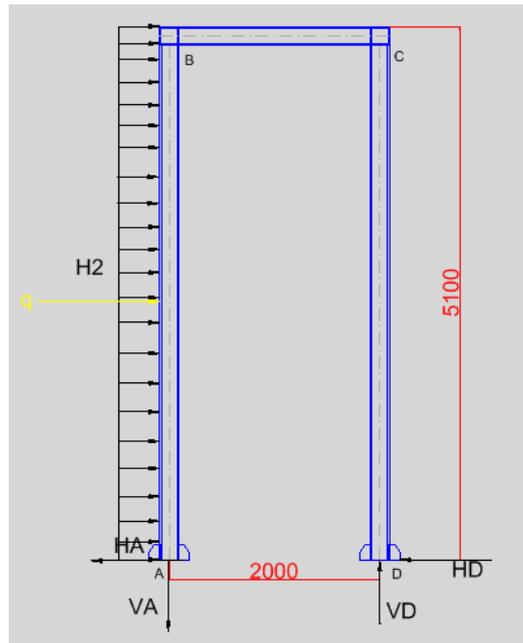


Figura 6.24.- Representación de reacciones por fuerza del viento sobre tubería del tramo 3

$$q = \frac{H2}{h}$$

$$V_{A,2} = V_{D,2} = \frac{q \cdot h^2 \cdot k}{s \cdot (6 \cdot k + 1)} = 46,55 \text{ kg}$$

$$H_{D,2} = \frac{q \cdot h \cdot (2 \cdot k + 3)}{8 \cdot (k + 2)} = 90,73 \text{ kg}$$

$$H_{A,2} = q \cdot h - H_D = 25,96 \text{ kg}$$

- Momentos:

$$M_{A,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(5 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{1}{k + 2}\right) = -132,48 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{B,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(1 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} + \frac{2}{k + 2}\right) = 32,65 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{C,2} = -\frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 - \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{2}{k + 2}\right) = -60,45 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{D,2} = \frac{q \cdot h^2}{24} \cdot \left(3 + \frac{2}{6 \cdot k + 1} - \frac{1}{k + 2}\right) = 71,99 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momentos máximos debido a H1 y H2:

$$M_A = M_{A,1} + M_{A,2} = -418,16 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_B = M_{B,1} + M_{B,2} = 285,30 \text{ kg} \cdot \text{m}$$



$$M_C = M_{C,1} + M_{C,2} = -313,10 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_D = M_{D,1} + M_{D,2} = 357,66 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, $M_{\text{máx}}$ sería:

$$M_{\text{máx}} = |M_A| = -418,16 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Momento máximo debido a F_R :

$$M_{FR} = \frac{F_R \cdot h}{2} = 2767,28 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Carga vertical máxima sobre una pata:

$$V = V_{D,1} + V_{D,2} + \frac{P_s}{2} + (84,81 + 73,78) \cdot l = 1438,50 \text{ kg}$$

Al tener perfiles HEB180:

- Área: $A = 65,25 \text{ cm}^2$
- I_y : 7,66 cm
- W_y : 425,7 cm^3
- W_x : 151,4 cm^3
- Límite elástico: $S_{ADM} = 275 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{W_y} + \frac{M_{\text{máx}} \cdot 100}{W_x} = 948,30 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 93,02 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Como $\sigma_{\text{máx}} < S_{ADM} \rightarrow \text{CORRECTO}$

PERNOS DE ANCLAJE

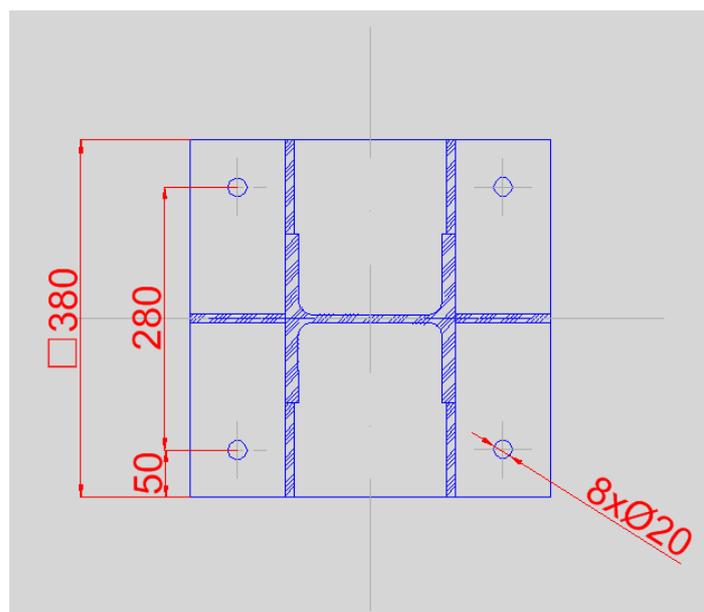


Figura 6.25.- Placa de anclaje y pernos de los soportes del tramo 3



Esfuerzo a tracción:

$$T = \frac{M_{m\acute{a}x}}{38 \cdot 2} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{38 \cdot 2} = 5688,30 \text{ kg}$$

Esfuerzo rasante por perno:

$$E_R = \sqrt{\frac{F_R^2 + (H1 + H2)^2}{8}} = 400,80 \text{ kg}$$

Carga vertical sobre la pata que más soporta:

- Peso tubería DN 350: $81,25 \cdot l = 568,75 \text{ kg}$
- Peso tubería DN 300: $73,78 \cdot l = 516,46 \text{ kg}$
- Peso soporte: $\frac{P_s}{2} = 624,64 \text{ kg}$

$$C = 568,75 + 516,46 + 624,64 = 1397,53 \text{ kg}$$

Esfuerzo de tracción por perno:

$$T_1 = T - \frac{C}{4} = 5338,92 \text{ kg}$$

Pernos M20 de grado 8,8

- $A_p = 2,45 \text{ cm}^2$
- Límite elástico $S_Y = 640 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_T = \frac{T_1}{A_p} + \frac{E_R}{A_p} = 2342,746086 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \rightarrow 229,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_T < S_Y \rightarrow \text{CORRECTO}$$

Fatiga en el hormigón:

$$R_x = R_y = \frac{70^3}{6} = 57166,66 \text{ cm}^3$$

$$A = 70^2 = 4900 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_H = \frac{V}{A} + \frac{M_{FR} \cdot 100}{R_x} + \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot 100}{R_x} = 5,86 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$



7.- ANÁLISIS DEL AHORRO ENERGÉTICO

Uno de los principales motivos que plantea la sustitución del antiguo BLNC#2 es la búsqueda de ahorrar energía en el proceso de comprimir nitrógeno gas para cumplir con la demanda de forma eficiente. Es por ello por lo que el nuevo compresor presenta una eficiencia energética mayor que la combinación de los dos actuales (BLNC#2 viejo y BLNC-GII)

Este análisis del ahorro energético se divide en dos partes, el ahorro producido por la sustitución por el nuevo compresor y el producido por la instalación del segundo nitroducto.

Dado que el caudal a suministrar se prevé que una vez instalado y en funcionamiento el nuevo compresor sea de unos 22.000 Nm³/h, para el BLNC#1 va a ser el mismo que durante 2017 de 11.216,16 Nm³/h de media, encargándose del resto el nuevo BLNC#2, es decir, alrededor de unos 11.000 Nm³/h.

En vista de lo anterior, aunque el BLNC#1 impulse el mismo caudal, la diferencia esta vez radica en el hecho de que con la instalación del nuevo nitroducto, la presión de descarga será inferior y por tanto la potencia empleada será menor y finalmente la energía consumida también sería menor, produciéndose así un ahorro energético. Por parte del BLNC#2, el ahorro procede del menor uso de potencia para suministrar esos 11.000 Nm³/h a la misma presión que en caso de los dos compresores que sustituye, por lo tanto, la energía consumida será menor y también que debido a la instalación del segundo nitroducto la presión de descarga será inferior, al igual que sucede con el BLNC#1.

Una vez instalado el nuevo compresor se prevé que la cantidad total suministrada sea el producto del caudal total impulsado por ambos compresores (22.215 Nm³/h) por el número de horas en funcionamiento a lo largo de un año (8.760 horas):

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad total suministrada por BLNC\#1 + Nuevo BLNC\#2} \\ & = 22.215 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 8760 \text{ h} \cdot \frac{1.2507 \text{ kg}}{\text{Nm}^3} = 243,4 \cdot 10^6 \frac{\text{kgN}_2}{\text{año}} \end{aligned} \quad (7.1)$$

Siendo las cantidades del BLNC#1 la misma que en 2017, la de la Tabla 3.3 (122,89x10⁶ kg/año) y del BLNC#2:

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad total suministrada por Nuevo BLNC\#2} \\ & = 11.000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 8760 \text{ h} \cdot \frac{1.2507 \text{ kg}}{\text{Nm}^3} = 120,5 \cdot 10^6 \frac{\text{kgN}_2}{\text{año}} \end{aligned} \quad (7.2)$$



7.1.- AHORRO PRODUCIDO POR EL BLNC#1

El ahorro energético se obtiene de la diferencia de energía consumida anual que se produciría para la presión de descarga en caso de usar un solo nitroducto de descarga y para la presión de descarga en caso de usar dos nitroducto de descarga.

El ahorro en este caso aparece ya expresado en el apartado de la primera comparación (5.5.1.-) y segunda comparación (5.5.2.-)

El ahorro de energía producido es el de la ecuación (5.26):

$$\text{Ahorro energía del BLNC\#1} = 14.261.280 - 13.972.200 = 289.080 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (7.3)$$

7.2.- AHORRO PRODUCIDO POR EL NUEVO BLNC#2

El ahorro energético se obtiene de la diferencia de energía consumida anual del nuevo compresor respecto a la combinación del compresor a sustituir más el compresor de GII. Para ello se utilizan los datos de funcionamiento a plena capacidad de los compresores actuales (Tabla 3.5) y se estima el consumo que obtendría el nuevo compresor en su lugar para suministrar la cantidad de la ecuación (7.2).

Debido a que no sabemos a ciencia cierta la cantidad que suministraría cada compresor para la cantidad total que se estimó, es decir, el antiguo BLNC#2 y el BLNC de GII, por ello calculamos el porcentaje de la cantidad de la ecuación (3.4) que suministró cada compresor en 2017.

| | Porcentaje total suministrado (%) |
|-----------------|-----------------------------------|
| BLNC#2 | 23,6 |
| BLNC-GII | 76,4 |

Tabla 7.1.-Porcentaje suministrado por antiguo BLNC#2 y BLNC-GII

Sabiendo el porcentaje se puede calcular cuanta cantidad suministrada por cada compresor:

| | Cantidad total suministrada C (kg/año) |
|-----------------|--|
| BLNC#2 | 28,44x10 ⁶ |
| BLNC-GII | 92,07x10 ⁶ |

Tabla 7.2.-Cantidad total suministrada estimada futuro por antiguo BLNC#2 y BLNC-GII

Sabiendo la cantidad total suministrada por cada compresor se calcula la energía consumida mediante la ecuación ((3.6) empleando la eficiencia energética de la Tabla 3.6.



| | Energía consumida E (kWh/año) |
|-----------------|-------------------------------|
| BLNC#2 | $3,41 \times 10^6$ |
| BLNC-GII | $10,52 \times 10^6$ |

Tabla 7.3.- Energía consumida estimada futuro antiguo BLNC#2 y BLNC-GII a plena capacidad

Siendo la energía total consumida la suma de las dos anteriores:

$$\begin{aligned} \text{Energía total consumida por BLNC\#2 + BLNC - GII} \\ \rightarrow 3,41 \cdot 10^6 + 10,52 \cdot 10^6 = 13,93 \cdot 10^6 \frac{kWh}{\text{año}} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Los datos de funcionamiento del nuevo BLNC#2 teniendo en cuenta el uso de un segundo nitroducto, la presión de descarga se reduce como se explica en el apartado 5.5.-, funcionando así a 1.535 KW de potencia que aparecen en la Tabla 5.12. Y de nuevo tendrá una nueva eficiencia energética estando presente el segundo nitroducto:

| | Eficiencia Energética η_M (c€/kg) |
|-------------------|--|
| BLNC Nuevo | 0,111 |

Tabla 7.4.-Eficiencia energética futura nuevo BLNC#2

Como se puede observar la eficiencia energética disminuye, haciendo más favorable la instalación del nuevo compresor.

La cantidad a suministrar por el nuevo BLNC#2 es la de la ecuación (3.4). Usando la eficiencia energética de la Tabla 7.4 se calcula la energía consumida (mediante la ecuación (3.6):

$$\text{Energía consumida por Nuevo BLNC\#2} \rightarrow 13,44 \cdot 10^6 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (7.5)$$

El ahorro producido es la diferencia de las ecuaciones (7.5) y (7.5):

$$\text{Ahorro energía producido por Nuevo BLNC\#2} \rightarrow 481.537 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (7.6)$$

La energía total ahorrada es la suma de las ecuaciones (7.3) y (7.6):

$$\text{Ahorro total energía} = 289.080 + 481.537 = 770.617 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (7.7)$$



8.- ANÁLISIS DEL AHORRO ECONÓMICO

Se realiza una estimación del ahorro económico en función de la energía consumida actualmente y la energía que se consumiría con la instalación del nuevo compresor y nitroducto. Tras esto se realizará una estimación de la tasa interna de retorno y el valor añadido neto.

El precio de la energía varía cada día en función del mercado eléctrico actual. Es por ello que se utiliza el precio medio del año anterior, de esta forma, los resultados del ahorro energético del apartado anterior son válidos. El coste del kWh de electricidad fue de 0'0935€ en 2017 (Praxair).

El ahorro económico anual se obtiene a partir del ahorro energético y multiplicando por el coste de la energía (ecuación (3.8):

$$\text{Ahorro económico} = 770.617 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \cdot 0,093 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 72.024 \frac{\text{€}}{\text{año}} \quad (8.1)$$

Es decir, cada año se ahorra en electricidad 72.024 €/año.

8.1.- ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD

Para poder analizar la rentabilidad de la inversión antes hay que conocer la inversión en sí. El equipo a instalar tiene un precio fijado en los 960.000€, pero no es la única inversión realizada, también se incluyen las tuberías, el equipo auxiliar de medición, la obra civil y todo el trabajo relacionado.

A todos los gastos se la ha de restar el dinero recibido a través de la subvención del IDAE con el objetivo de que las empresas inviertan en mejorar la eficiencia energética y la reducción de emisiones para que España cumpla con las directrices europeas para 2020 (IDAE, 2014 - 2020). Esta subvención se les da a las empresas por mejorar la eficiencia energética de equipos o realizar sustituciones entre otros motivos. La cuantía depende del tipo de proyecto y la ubicación del mismo. Esta ayuda económica es para PYMES y grandes empresas, variando la cuantía en función del tamaño. Praxair es una gran empresa ubicada en Asturias, por lo que se aporta el mínimo general, el 30% de la inversión escogida (Ministerio de energía, 2017, pág. 9). La inversión escogida engloba la parte del presupuesto directamente relacionada con la mejora de la eficiencia energética, quedando únicamente a parte los gastos propios, como el salario de los trabajadores, y los impuestos. La obra civil sólo se encuentra cubierta si ésta no supera el 20% de la inversión escogida (Ministerio de energía, 2017, pág. 8). En este caso, la obra civil es prácticamente inexistente ya que se aprovechará la cimentación del compresor actual, por lo que será financiada.



La inversión escogida abarca, por tanto, la adquisición y transporte del equipo, elaboración de los proyectos técnicos, costes de dirección facultativa, costes de ejecución de obra civil, costes de montaje de equipos e instalaciones auxiliares, costes de asistencia técnica, costes necesarios para la legalización de las instalaciones y obtención de licencias y el coste de todas las actuaciones preparatorias de la actuación como pueden ser los proyectos y memorias técnicas a entregar a la administración.

Quedarán exentos los costes acontecidos en una fecha anterior a la de la solicitud, los impuestos y tasas ni los costes asociados a los aumentos de capacidad. Tampoco entran las instalaciones de cogeneración ni, al tratarse de una gran empresa, los costes de las auditorías energéticas.

8.1.1.- Valor actual neto

El valor actual neto o VAN, es un indicador de la viabilidad de un proyecto. Consiste en actualizar los cobros y pagos de una inversión para estimar el valor de un proyecto (ESAN). Si el VAN es negativo, el proyecto no es viable y si es mayor que cero es rentable. En este caso, los pagos son presupuesto total y los cobros se derivan de la subvención del IDAE y el ahorro económico debido a la mejora de eficiencia energética.

La formulación para obtener el VAN es la siguiente.

$$VAN = -I + \frac{R(1 - (1 + i)^{-n})}{i} \quad (8.2)$$

8.3

Donde i es el tipo de interés, n es el periodo estudiado de amortización, en este caso 10 años, R el flujo de caja, en este caso el ahorro energético anual, e I la inversión inicial.

Esta ecuación sólo es válida para flujo de carga constante, por ello, la subvención se implementa en el año cero junto a los pagos del presupuesto. Por lo tanto, la inversión inicial será la siguiente.

$$I = P_T - S \quad (8.4)$$

Donde P_T es el presupuesto total y S la subvención.

El VAN se estudia para ver la viabilidad a 11 años. Este indicador también sirve para ver cuando se amortiza un proyecto. Para ello se iguala el VAN a cero y se calcula el periodo n .

$$n = -\frac{\ln\left(1 - \frac{I \cdot i}{R}\right)}{\ln(1 + i)} \quad (8.5)$$

El tipo de interés es un factor influyente y su utilidad es actualizar el dinero al valor futuro. Esta tasa es un valor bancario que depende del crédito y viene determinado por los valores del Banco Central Europeo o, en este caso, el Banco de España (Banco de España,



2017-actual). Según los datos del Banco de España, el tipo de interés está al 0%, el motivo de esto es la crisis económica que ha azotado al país y de la cual aún se está saliendo.

Para una amortización a 11 años, el flujo de carga será el reflejado en la siguiente tabla:

| Amortización | |
|--------------|------------|
| 0 | -767575,02 |
| 1 | 72024,95 |
| 2 | 72024,95 |
| 3 | 72024,95 |
| 4 | 72024,95 |
| 5 | 72024,95 |
| 6 | 72024,95 |
| 7 | 72024,95 |
| 8 | 72024,95 |
| 9 | 72024,95 |
| 10 | 72024,95 |
| 11 | 72024,95 |

Tabla 8.1.-Flujo de carga

El resultado del VAN para este proyecto a 11 años es de 24.224 €.

Tras saber que el proyecto es rentable se ha de verificar cuál es el periodo de amortización. Para ello se resuelve la ecuación (8.5).

El proyecto se amortiza en 10 años, 7 meses y 29 días después de poner en funcionamiento el compresor, sin contar con el nuevo contrato con el cliente a suministrar.

8.1.2.- Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno, o TIR, es un indicador financiero similar al VAN, pero con la diferencia de que no mide valor de un proyecto sino la rentabilidad. El TIR se puede definir como la tasa de descuento para que el VAN sea cero en un determinado periodo. Es decir, se parte de la ecuación para el cálculo del VAN, el cual se iguala a cero y se despeja el tipo de interés (ESAN). El resultado será el TIR.

Como el cálculo es relativamente complejo se utiliza la función del Excel TIR.

$$= TIR(valores)$$

Donde los valores son todos los flujos de carga, en positivo, y la inversión, en negativo.

Los flujos de carga son los mismos de la **referencia**. El resultado del TIR es del 1%, es decir, sería necesario un interés bancario del 1% para que resultase más rentable dejar el dinero invertido en un banco que en realizar la inversión.



9.- BIBLIOGRAFÍA

AENOR UNE EN 292. (1993). *UNE EN 292*.

EN 10204/3.1B.

Banco de España. (2017-actual). *Tipo de interés*. Obtenido de https://www.bde.es/webbde/es/estadis/infoest/ti_1_1.pdf

Banco de España. (s.f.). *Cotización EURUSD*. Obtenido de https://www.bde.es/webbde/es/estadis/infoest/tc_1_1.pdf

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. (2011).

BSc. (s.f.). *Ptable*. Obtenido de <https://www.ptable.com/>

ASME VII Edición 2015.

ASME II Edición 2015.

ASME B31.8 Edición 2016. Gas Transmission and Distribution Piping Systems.

ASME B31.1 Edición 2016. Power Piping.

ASME B36.10. Stainless Steel Pipe.

ASME B31.3. Process Piping Guide.

ASME 16.5 Edición 2013. Pipe Flanges and Flanged Fittings.

ASME 16.9 Edición 2012. Steel Fittings.

Estándares de Ingeniería de Praxair.

Estándares de Seguridad y Salud de Praxair.

PROYECTO DE UNA PLANTA DE SEPARACIÓN DE AIRE PROPIEDAD DE PRAXAIR IBÉRICA S.A., SITUADA EN GIJÓN, MUNICIPIO DE GIJÓN (ASTURIAS) con visado nº 950201 por el Colegio Oficial de Ingenieros Superiores Industriales de Asturias y León.

PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL NITRODUCTO DE GIJÓN PARA LA SUSTITUCIÓN DEL MEDIDOR M9 Y CONEXIÓN A FUTURO NITRODUCTO HACIA ARCELOR-MITTAL PROPIEDAD DE PRAXAIR S.A., SITUADA EN GIJÓN, MUNICIPIO DE GIJÓN (ASTURIAS) con visador nº 20170618V por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales del Principado de Asturias.

PROYECTO DE MODIFICACIÓN DEL NITRODUCTO DE TABAZA PARA INSTALACIÓN DE UN SEGUNDO COMPRESOR DE NITRÓGENO Y UN SEGUNDO NITRODUCTO PROPIEDAD DE PRAXAIR S.A., SITUADA EN GIJÓN, MUNICIPIO DE GIJÓN (ASTURIAS) con visador nº 20150174V por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales del Principado de Asturias.



Registro Industrial 33/ 23.978 y Autorización de Puesta en Servicio según consta en el expediente R.I. nº 23.978, referencia JRA/ATA, fecha 10 de julio de 1997.

PROYECTO DE TUBERÍA PARA NITRÓGENO-GAS DESDE LA FÁBRICA DE "UNIÓN CARBIDE" A LA ACERÍA DE ENSIDESA-VERIÑA (Avilés Enero 1984)

PROYECTO DE GASODUCTOS PARA EL SUMINISTRO AL POLÍGONO INDUSTRIAL DE TAMÓN (Diciembre 1991)

EAE. Instrucción de Acero Estructural.

CTE-DB-SE-AE. Código Técnico de Edificación-Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación

Catálogo Arcelor 2004.

DIRECTIVA 2014/68/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de mayo de 2014 relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión.

Reglamento de Equipos a Presión, R.D. 2060/2008, de 12 de diciembre.

Real Decreto 769/1999, de 7 de mayo, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y de Consejo, 97/23/CE, relativa a los equipos de presión y se modifica el Real Decreto 1244/1979, de 4 de abril que aprobó el Reglamento de Aparatos a Presión.

Reglamento de Aparatos a Presión, R.D. 1244/1979, de 4 de abril.

ESAN. (s.f.). *Fundamentos financieros*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/fundamentos-financieros-el-valor-actual-neto-van/>

ESAN. (s.f.). *Indicador de rentabilidad*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/un-indicador-clave-de-rentabilidad-la-tasa-interna-de-retorno-tir/>

IDAE. (2014 - 2020). *Fondo Europeo de Desarrollo Regional*. Obtenido de <http://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/fondo-europeo-de-desarrollo-regional-feder-0>

Irestal. (s.f.). *propiedades acero inoxidable*. Obtenido de <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>

Libretext. (9 de Febrero de 2017). *Standard enthalpy of formation*. Obtenido de https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Enthalpy/Standard_Enthalpy_Of_Formation

Ministerio de energía. (2017). Disposición 5724 del BOE núm. 122 de 2017. *BOE*.

NASA. (5 de Mayo de 2015). *Equation State*. Obtenido de <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/eqstat.html>



NASA. (16 de Marzo de 2017). *Air Composition*. Obtenido de Earth facts sheet:
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

Parlamento Europeo . (2012). *Directiva 2012/27/UE*.

Praxair. (2017). *Praxair*. Obtenido de <http://www.praxair.es/>

Schack, A. (1962). *Der Industrielle Wärmeübergang*. Düsseldorf: Stahleisen Publications.

Secretaría del Gobierno de España. (2015). *Informe situación energética en España 2015*.

Tabla de propiedades termodinámicas de algunos gases. (s.f.).

Vemacero. (s.f.). *TUBERIA DE ACERO AL CARBONO API 5L / ASTM A53 / A106 Espesor de Pared NPS DN Pulgadas Milímetros*.



En Oviedo, a 05 de julio de 2018

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser 'Pablo Gómez Escalante', escrita sobre una línea horizontal.

Fdo.: Pablo Gómez Escalante