

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE UNA VIVIENDA MEDIANTE SUELO RADIANTE CON BOMBA DE CALOR

Diego Delgado Álvarez [*] **Inés Suárez Ramón, María Manuela Prieto González** [**]
[*] Alumno; [**] Tutor(es)
Uo197883@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En este trabajo se pretenden evaluar distintas actuaciones destinadas a la reducción de la demanda térmica de una vivienda unifamiliar situada en Gijón. Para ello se analizará el comportamiento térmico del edificio en distintos supuestos y se valorarán distintas actuaciones desde el punto de vista de la eficiencia energética, económica y ambiental. Entre estas actuaciones se incluyen la recuperación de calor, la reducción de los requerimientos de ventilación, el aumento del espesor de aislamiento y la mejora de las características térmicas de ventanas.

De todas ellas, la instalación de un recuperador de calor se presenta como una de las medidas más interesantes, produciéndose una reducción de hasta un 43,49% de la demanda energética.

La aplicación conjunta de todas las medidas de mejora supone la reducción de la demanda en hasta un 76,37%.

También se realiza el diseño y dimensionamiento de la instalación de calefacción del edificio, constituida por una bomba de calor aire-agua y distribución por suelo radiante.

Debe ponerse de manifiesto que la aplicación de todas las medidas de mejora supone una reducción de la carga térmica de un 55,62%, lo que repercute de forma importante en las instalaciones de calefacción, especialmente en la potencia del generador de calor, con lo que parte de los sobrecostes que estas actuaciones suponen se ven en parte compensadas.

ABSTRACT

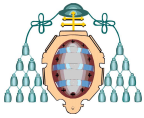
In this paper we intend to evaluate different actions aimed at reducing the thermal demand of a detached house situated in Gijón. This will involve analyze the thermal behavior of the building on different assumptions and different actions will be assessed from the point of view of energy efficiency, economic and environmental. These actions include heat recovery, reduction of ventilation requirements, increase the insulation thickness and improve the thermal characteristics of windows.

Of these, the installation of a heat recovery is presented as one of the most interesting measures, resulting in a reduction of up to 43,49% of the energy demand.

The joint application of all measures of improvement is the reduction in demand by up to 76,37%.

Also performed the design and sizing of the heating system of the building, consisting of a heat pump air-water and underfloor heating.

To point out that the implementation of all improvement measures involve a reduction of the thermal load in a 55.62%, which impacts significantly on heating systems, especially in the power of the heat generator, so part of the additional costs that these actions represent are partially compensated.



1. INTRODUCCIÓN

El sector residencial es un sector clave en el contexto energético nacional y comunitario actual debido a la importancia que reviste su demanda energética, que en términos de consumo total y de consumo eléctrico asciende respectivamente a un 17% y 25% a nivel nacional, y al 25% y 29% a nivel de la UE27[1]. Por ello, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para disminuir la dependencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con estos objetivos el Parlamento Europeo aprueba el 19 de Mayo de 2010 la Directiva 2010/31/CE [2], que establece que todos los edificios públicos construidos en Europa deben de ser "edificios de energía casi nula" a partir del 31 de diciembre de 2018, posponiéndose su aplicación al 31 de diciembre de 2020 a los edificios de titularidad privada. Esto supone el endurecimiento de los requisitos de eficiencia energética en los edificios, lo que obligará a revisar el Código Técnico de la Edificación (CTE) [3], y la promoción del uso de sistemas de alta eficiencia. En este mismo sentido, se aprueba una nueva Directiva 2012/27/UE [4] que, en lo que afecta al sector residencial, otorga al sector público un papel ejemplarizante al imponer una renovación anual del 3% de la superficie total de sus edificios a partir del 1 de enero de 2014, de manera que cumpla al menos los requisitos de rendimiento energéticos mínimos fijados por cada Estado. Este contexto implicará una revolución en el proceso de diseño y construcción de los edificios, cobrando especial importancia sus instalaciones térmicas.

Este trabajo pretende estudiar cuatro diferentes casos. El caso de partida (*caso base sin recuperación de calor*) está realizado para dar cumplimiento a los requisitos establecidos por el CTE [3] (la demanda total de ventilación del edificio es de 413 m³/h). El siguiente caso de estudio (*caso base con recuperación de calor*) incluye la instalación de un recuperador de calor con los mismos requisitos de caudales de ventilación establecidos por el CTE [3].

Debido al planteamiento de las directivas europeas 2010/31/CE [2] y 2012/27/UE [4],

además del auge de los estándares *Passivhaus* [5], se intuye la necesidad de modificar el CTE [3]. Por ello, el siguiente caso de estudio (*caso mejorado con recuperación de calor*) se basa en los estándares *Passivhaus* [5] en cuanto a ventilación (la demanda total de ventilación pasa a ser 210 m³/h). En este caso, se aumenta el espesor de aislamiento en los muros exteriores, forjados y cubiertas de la vivienda. Por último, se estudia un *caso mejorado plus con recuperación de calor*, en el cual se introducen unas ventanas de mejores características térmicas para acercarse a los estándares *Passivhaus* [5].

Para cubrir la demanda de calefacción de la vivienda se propone, para los cuatro casos de estudio, el empleo de una bomba de calor aire-agua. La distribución del calor a los locales se realiza a baja temperatura, unos 40°C, mediante un sistema de calefacción por suelo radiante.

2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

La vivienda unifamiliar objeto de estudio se encuentra ubicada en Gijón, Asturias. La parcela tiene una superficie de 500 m², de los cuales 134,14 m² corresponden a la propia vivienda cuya fachada principal se encuentra orientada 36° con respecto al Norte geográfico en sentido horario.

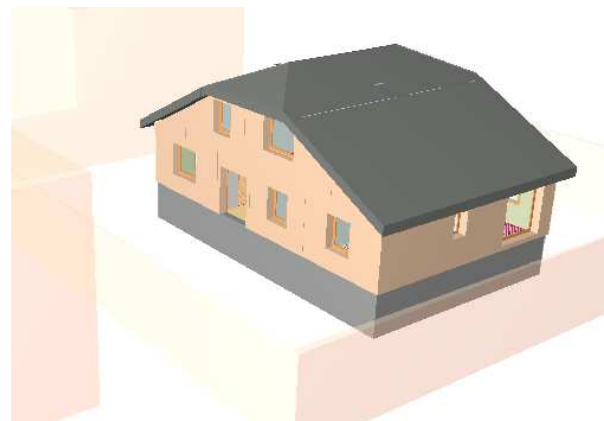


Figura 1: Visión general de la vivienda

La vivienda está formada por dos plantas, además de un sótano y tres buhardillas no habitables. La planta baja cuenta con una cocina, un salón, un pasillo, dos habitaciones y un baño.

La planta superior consta de dos baños, tres habitaciones y un pasillo.

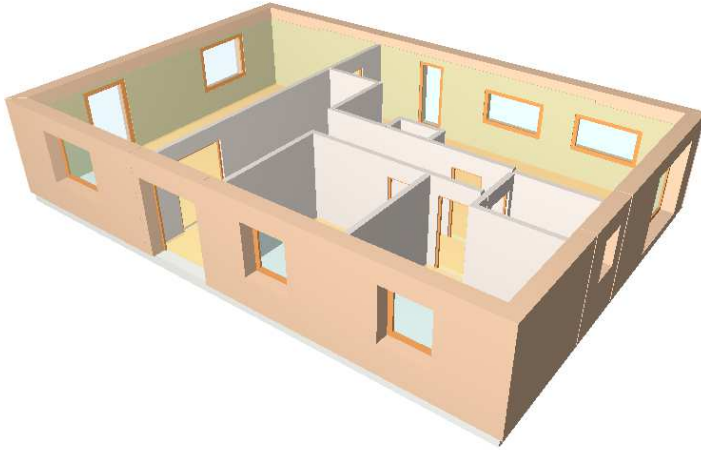
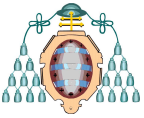


Figura 2: Planta baja

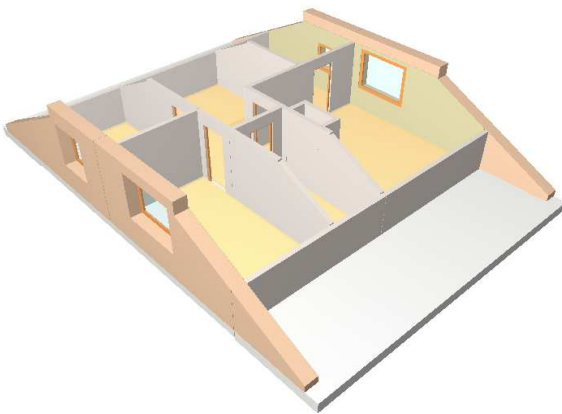


Figura 3: Primera planta

CERRAMIENTOS

En este apartado se describen los diferentes materiales que componen los muros exteriores, particiones interiores, muros de sótano, forjados y cubierta. Los materiales se indicarán por este orden: de arriba hacia abajo para los cerramientos horizontales y desde afuera hacia adentro para los verticales.

Los muros exteriores están formados por una capa de mortero de cemento, termoarcilla, cámara de aire, aislamiento XPS, machetón y enlucido de yeso. Los muros de sótano están formados por un muro de hormigón de 40cm.

Las particiones interiores se componen por capas de enlucido de yeso, rasilla, machetón, rasilla y enlucido de yeso.

El forjado de la cámara sanitaria se compone de solado de baldosas cerámicas de gres esmaltado, capa de mortero autonivelante, panel portatubos aislante de poliestireno expandido EPS, forjado unidireccional y aislante XPS.

El forjado entre las plantas se compone de solado de baldosas cerámicas de gres esmaltado, capa de mortero autonivelante, panel portatubos aislante de poliestireno expandido EPS, forjado unidireccional y enlucido de yeso.

El forjado de la buhardilla ubicada sobre la primera planta está compuesto por mortero de cemento, aislante XPS, forjado unidireccional y enlucido de yeso.

Finalmente, la cubierta se compone de pizarra, capa de sellado, capa impermeabilizante, capa de sellado, aislante XPS, barrera antivapor, forjado unidireccional y mortero de cemento.

PUERTAS

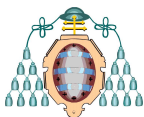
La puerta exterior es de 1800x2150 mm. Las puertas interiores son de 800x2000 mm salvo una puerta de doble hoja de 1500x2000 mm que se encuentra en el salón. Todas las puertas son de madera y tienen un coeficiente de transmisión térmica de 2,55 W/m² °C.

Esta descripción de las puertas es válida para los cuatro casos de estudio.

VENTANAS

Se distinguen dos tipos de ventanas. Las primeras, correspondientes al *caso base sin recuperación de calor*, *caso base con recuperación de calor* y *caso mejorado*, tienen marco de PVC, doble acristalamiento 4/6/4, coeficiente de transmitancia térmica $U_{\text{medio}} = 3,51 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$, factor solar $g = 0,78$, retranqueo de 24 cm, color intermedio, clase 2 y practicables.

Para el caso *mejorado plus*, se sustituyen las ventanas por otras de mayores prestaciones: $U_{\text{marco}} = 0,75 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$, $U_{\text{cristal}} = 1,3 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ y factor solar $g = 0,64$.



3. CASOS DE ESTUDIO

Se han planteado cuatro casos de estudio diferentes.

El *caso base* será estudiado de dos formas diferentes: sin recuperación de calor, y con recuperación de calor. En ambos casos se cumplen los requisitos de ventilación impuestos por el CTE [3], ascendiendo el caudal total de ventilación a unos 413 m³/h. El espesor de aislamiento de los cerramientos será de 4cm para los muros exteriores, 6 para los forjados y 8 para la cubierta.

Para los *casos mejorado y mejorado plus* se incrementa el espesor del aislante que pasa a ser de 12 cm para los muros exteriores, 12 cm para los forjados y 16 cm para la cubierta. Además, se reduce el caudal de ventilación a unos 210 m³/h, más acordes con los estándares *Passivhaus* [5].

Para el *caso mejorado plus* también se plantea la instalación de ventanas con unas prestaciones superiores.

Por tanto, los casos mejorado y mejorado plus forman una situación intermedia entre el cumplimiento del CTE [3] vigente, y los estándares *Passivhaus* [5].

En la tabla 1 se resumen los cuatro casos de estudio.

CASO	ESPESOR AISLANTE (CM)			RECUPERADOR	CAUDAL DE VENTILACIÓN
	Muros	Forjados	Cubierta		
Base sin rec.	4	6	8	No	Según CTE 413 m ³ /h
Base con rec.	4	6	8	Sí	Según CTE 413 m ³ /h
Mejorado	12	12	16	Sí	Estándar Passivhaus 210 m ³ /h
Mejorado plus	12	12	16	Sí	Estándar Passivhaus 210 m ³ /h

Tabla 1: Resumen de los casos de estudio

Los coeficientes de transmisión térmica de los cerramientos serán los indicados en la Tabla 2.

COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN TÉRMICA, en kcal/h·m ² ·°C				
Cerramiento	Caso base	Base con rec.	Mejorado	Mejorado plus
Muro exterior	0,41	0,41	0,19	0,19
Muro sótano	2,29	2,29	2,29	2,29
Muro interior	1,38	1,38	1,38	1,38
Forjado sanitario	0,32	0,32	0,19	0,19
Forjado entreplantas	0,38	0,38	0,21	0,21
Cubierta	0,31	0,31	0,17	0,17

Tabla 2: Coeficientes de transmisión térmica

4. CARGA TÉRMICA

En el diseño de la instalación de calefacción, así como en el cálculo de las cargas térmicas correspondientes, se han fijado una serie de condicionantes y premisas, tanto interiores como exteriores, con el fin de alcanzar un adecuado comportamiento de la instalación.

La temperatura interior de diseño del sistema de calefacción será de 21 °C, dentro de los valores de temperatura operativa fijada por el RITE [6]. Para establecer las condiciones de temperatura exterior mínima de proyecto se recurre a la UNE 100001 [7] tomando como ciudad de referencia Oviedo por tratarse de la ciudad más próxima a la de estudio. Para un nivel de percentil estacional del 97,5% y una corrección por diferencia de cota de 1°C por cada 100m de desnivel, la T^a exterior de diseño se establece en 3,2°C.

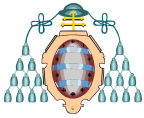
El cálculo de la carga térmica se ha llevado a cabo conforme a lo establecido en la norma UNE EN 12831:2003 [8]. Para realizar este cálculo se ha empleado el software informático *CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)* [9] de la empresa CYPE Ingenieros, S.A., versión After Hours, destinada principalmente a estudiantes. Ofrece la posibilidad de exportar los datos introducidos a EnergyPlus™[10], software de libre distribución de simulación dinámica que permitirá hacer los estudios de demanda y consumo energético.

RESUMEN DE CARGAS TÉRMICAS

En este apartado se pretende mostrar un pequeño resumen de las cargas térmicas obtenidas con el software *CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)* [9].

Las pérdidas por transmisión en los dos primeros casos tienen el mismo valor debido a que no se modifican los cerramientos existentes en el edificio. En los *casos mejorado y mejorado plus* se puede ver que la pérdida térmica por transmisión disminuye por el aumento del espesor de aislamiento en el primer caso, y por el aumento del aislamiento y la mejora de las ventanas en el segundo.

Las pérdidas térmicas por ventilación en el *caso base sin recuperación de calor* son muy elevadas, debido a los altos requerimientos de ventilación establecidas por el CTE [3], 413 m³/h, y a que el aire se introduce en la vivienda directamente desde el exterior mediante rejillas y aireadores en



las ventanas. El caso base con recuperación de calor, las pérdidas disminuyen enormemente debido a la eficiencia del 85% del recuperador. En los casos mejorado y mejorado plus se obtienen unas pérdidas por ventilación aún menores debido a que, además de reducirse las necesidades de ventilación de 413 m³/h a 210 m³/h, la eficacia del recuperador de calor es superior al tratar menor caudal, ascendiendo al 92%.

Las pérdidas por intermitencia son iguales para los dos primeros casos de estudio, en los que se considera un tiempo de recalentamiento de 2 horas y una caída de temperatura interior asumida durante la desconexión de 2 °C. En los casos mejorado y mejorado plus, se considera el mismo tiempo de recalentamiento. Sin embargo, se reduce la caída de temperatura interior asumida durante la desconexión a 1 °C.

En la tabla 3 se muestran las pérdidas por transmisión, ventilación e intermitencia para cada uno de los cuatro casos de estudio.

CASO	TRANSMISIÓN (W)	VENTILACIÓN (W)	INTERMITENCIA (W)	TOTAL (W)
Base sin rec.	5720,97	3025,12	2092,92	10839,01
Base con rec.	5720,97	453,77	2092,92	8267,66
Mejorado	4869,24	167,71	1141,59	6178,54
Mejorado plus	3501,15	167,71	1141,59	4810,45

Tabla 3: Carga térmica

DISTRIBUCIÓN DE CARGAS TÉRMICAS

En la figura 4, se puede ver un gráfico de barras donde se recoge la cuantía de las pérdidas por transmisión (desglosadas en huecos, puentes térmicos, paredes, suelos y techos), por ventilación y por intermitencia, sobre el conjunto total de pérdidas.

El gráfico indica que la potencia necesaria de calefacción es sustancialmente menor en cualquiera de los tres casos con respecto al caso base sin recuperación de calor.

Los importantes requerimientos de ventilación impuestos por el CTE [3] otorgan a la ventilación un peso de un 34,6% sobre la potencia total de diseño. La simple instalación de un recuperador de calor implica una caída de la carga térmica de un 32,72% pasando la ventilación a representar solo un 7,35% del total. Si a esto le añadimos una reducción de los caudales de ventilación a los

estándares *Passivhaus* [5] la reducción es aún mayor.

Otra de las medidas, propuesta en el caso mejorado y mejorado plus, es el incremento del espesor de aislamiento. Las reducciones, aunque no en la misma cuantía, también son importantes.

Por último, la mejora de las prestaciones térmicas de las ventanas suponen pasar de los casi 2000 W que les son atribuibles en los tres primeros casos a unos 630 W en el caso mejorado plus, una reducción del 32%.

La aplicación conjunta de todas las medidas supone una reducción de la carga térmica de un 55,62%, lo que repercutirá de forma importante en el tamaño y, por tanto, en el coste de las instalaciones de calefacción necesarias, con lo que el sobrecoste que estas medidas suponen se verán en parte compensadas.

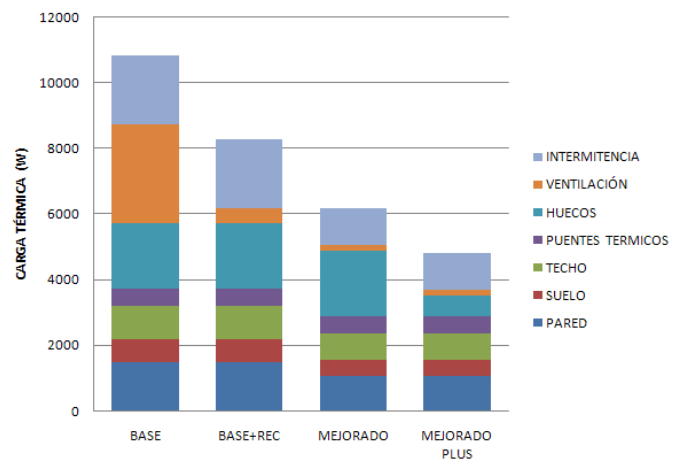
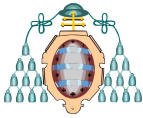


Figura 4: Distribución de cargas térmicas

5. INSTALACIÓN DE SUELO RADIANTE

El suelo radiante se basa en una red de tuberías empotradas en una capa de mortero que son atravesadas por una corriente de agua caliente. La capa de mortero absorbe la energía térmica disipada por las tuberías y la cede al pavimento que, a su vez, emite esta energía al local mediante radiación y en menor grado por convección natural.

El calor por radiación proporciona una sensación de bienestar incomparable al distribuirse uniformemente por todo el local. Se obtiene el mismo grado de bienestar que en otros sistemas



tradicionales a temperaturas ambientales más bajas, lo que unido al menor nivel de T^a del agua de impulsión exigido, unos 40°C , se traduce en un importante ahorro energético y que este sistema sea compatible con casi cualquier fuente energética (electricidad, combustibles derivados del petróleo, energía solar, aerotermia, geotermia, energía solar, etc.).

Otras características destacables pueden ser las siguientes:

- Perfil óptimo de temperaturas del cuerpo humano
- Emisión térmica uniforme
- Calefacción sin movimientos de aire
- Ahorro energético
- Calefacción invisible
- Compatible con cualquier tipo de suelos

La figura 5 es un esquema del sistema de calefacción por suelo radiante en el que se pueden observar los elementos más importantes.

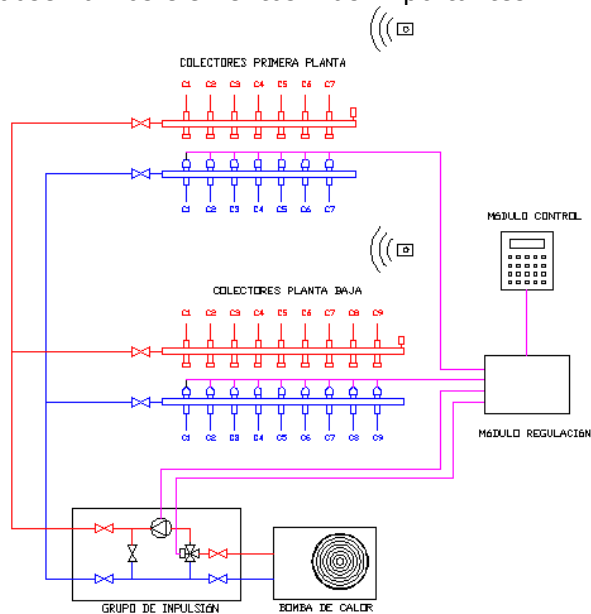


Figura 5: Esquema instalación de suelo radiante

El dimensionado de los distintos elementos que componen el sistema se ha realizado con el programa informático CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio) [9]. La metodología de cálculo seguida por el programa es el de la norma UNE EN 1264 [12]. También se han tenido en cuenta las recomendaciones de fabricantes, en concreto el "Manual técnico para instalaciones de calefacción y refrigeración por suelo" de Uponor

[13]. A continuación se resumen los resultados obtenidos y se realiza un resumen del procedimiento seguido por el programa.

BOMBA DE CALOR

Para determinar la potencia de la bomba de calor a instalar se parte de la carga térmica del edificio. Para ello se analizarán las curvas de potencia de distintos modelos de bombas de calor y se elegirán aquellas que mejor se ajusten a cada caso. En el Anexo 1 se incluyen las curvas de potencia y COP de los modelos seleccionados.

En la tabla 4 se resumen las características más importantes de las bombas de calor seleccionadas, en concreto los modelos RVL06, RVL08, RVL12 y RVL14 de la marca comercial Ferroli [11].

CASO	CARGA TÉRMICA(W)	MODELO BOMBA CALOR	POTENCIA TÉRMICA NOMINAL* (KW)	COP NOMINAL*	POTENCIA TÉRMICA (KW)**	COP **
Base sin rec.	10839,01	RVL14	14,0	3,21	12,5	2,7
Base con rec.	8267,66	RVL12	12,9	3,03	10,5	2,7
Mejorado	6178,54	RVL08	7,4	3,19	6,3	2,4
Mejorado plus	4801,45	RVL06	5,8	3,05	4,9	2,6

*Prestaciones nominales a T° ext. de 7°C y T° impulsión 40-45 $^{\circ}\text{C}$.

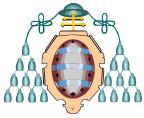
**Prestaciones de diseño a T° ext. de 3°C y T° impulsión 40-45 $^{\circ}\text{C}$.

Tabla 4: Características bombas de calor.

Hay que tener en cuenta que la bomba de calor debe seleccionarse para las condiciones exteriores de diseño, en nuestro caso $3,2^{\circ}\text{C}$.

CIRCUITOS EMISORES

Las tuberías emisoras de la marca UPONOR modelo Wirsbo-evalPEX [13], son las elegidas para este proyecto. Están especialmente diseñadas para los sistemas de calefacción por suelo radiante. Son tuberías de polietileno reticulado con barrera antidifusión de oxígeno. Se emplean tanto como tuberías emisoras (UPONOR Wirsbo-evalPEX 16x1,8, 17x2 ó 20x1,9) como en montantes y tuberías de distribución (UPONOR Wirsbo-evalPEX 25x2,3 hasta UPONOR Wirsbo-evalPEX 110x10). En las tuberías plásticas convencionales empleadas para la conducción de agua caliente en circuitos cerrados las moléculas de oxígeno del aire penetran a través de la pared de la tubería cuando, al aumentar la temperatura, el espacio intermolecular de la tubería tiende a ser mayor que la molécula de oxígeno. Este fenómeno origina una permanente oxigenación del agua y la consiguiente oxidación continuada de las partes



metálicas. La barrera antidifusión de oxígeno evita estos problemas, puesto que reduce drásticamente el aporte extra de oxígeno al caudal de agua.

El diseño aconsejado de los circuitos es, o bien el doble serpentín o en espiral [13]. Según estas configuraciones las tuberías de ida y de retorno siempre son contiguas, estando además siempre la tubería más caliente próxima a la más fría. Estos diseños aseguran una homogeneización de la emisión térmica. El doble serpentín es recomendable especialmente en locales cuya planta posea una forma geométrica compleja. La configuración en espiral se recomienda allí donde la planta a calefactar posea una forma geométrica sencilla. Tiene como ventaja unas curvas menos pronunciadas lo cual facilita la instalación.

Cada local será climatizado por circuitos independientes. De este modo se posibilita la regulación de temperaturas de cada estancia de forma independiente. En las figuras 6 y 7 se muestran los circuitos emisores de la planta baja y de la planta primera respectivamente.

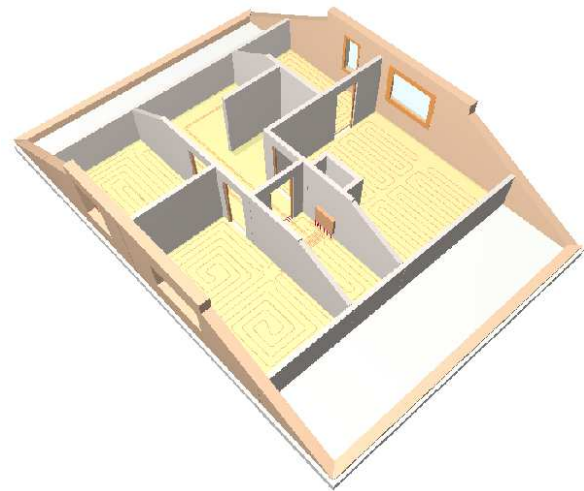


Figura 7: Circuitos emisores planta primera.

Para el cálculo de cualquier sistema de suelo radiante habrá que tener en cuenta lo especificado en la norma UNE EN 1264 [12]. La citada norma establece una relación entre el flujo térmico y la temperatura media de la superficie del suelo, quedando establecida la relación entre ellas de la siguiente manera:

$$q = 8,92 \cdot (\theta_{p,med} - \theta_i)^{1,1} \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

Considerando que la temperatura máxima del pavimento está establecida en 29°C para zonas ocupadas y 33°C para cuartos de baño y similares y que la temperatura ambiente normalmente considerada es de 20°C y 24°C respectivamente, el flujo térmico límite será de 86 kcal/h·m² en ambos casos. Este valor, es suficiente para la mayoría de los edificios. Para aquellos locales con mayores pérdidas térmicas, la norma permite crear zonas "perimetrales", definidas como no ocupadas, con un máximo de 1 m de anchura, las cuales pueden alcanzar una temperatura superficial de 35°C. En este caso, el flujo térmico límite será de 150 kcal/h·m².

La tabla 6 recoge los resultados obtenidos para los cuatro casos de estudio, y se comprueba que en ningún caso se supera el flujo térmico límite.

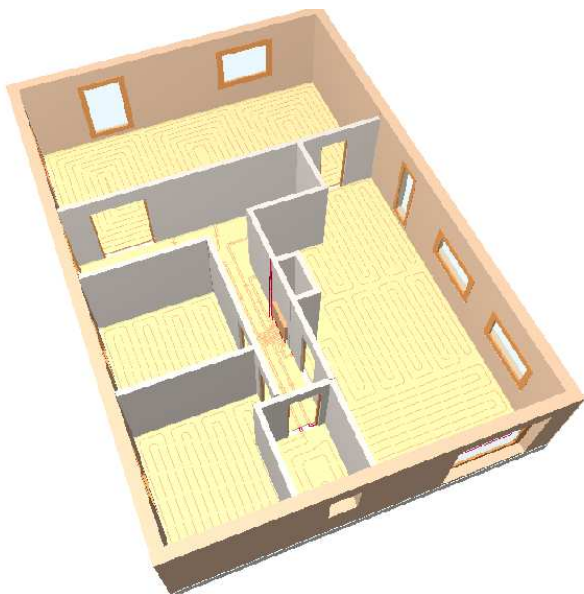
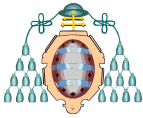


Figura 6: Circuitos emisores planta baja.



Local	DENSIDAD DE FLUJO TÉRMICO (Kcal/h·m ²)			
	Caso base	Base con rec.	Mejorado	Mejorado plus
Baño 1	82.0	46.7	39.9	32.5
Habitación 2	52.0	43.9	38.7	32.8
Habitación 1	44.2	36.1	31.7	25.8
Salón	54.1	45.2	40.4	32.5
Cocina	67.3	51.0	45.5	34.7
Baño 3	55.1	41.7	39.8	28.6
Habitación 5	48.1	40.3	33.9	29.3
Baño 2	51.2	30.2	25.1	25.1
Habitación 4	51.6	39.1	34.2	26.7
Habitación 3	47.9	40.1	33.2	29.0

Tabla 5: Flujo térmico

Dependiendo del tipo de sistema a instalar se elegirá la dimensión de tubería correspondiente así como el paso de tubo para obtener la potencia térmica necesaria.

En los sistemas de suelo radiante Uponor [13] el tipo de tubería emisora y la separación entre tubos son factores de diseño que permanecen constantes a lo largo de toda la instalación. Para calefacción se considera habitual una separación de 20 cm. La longitud de la tubería para cada circuito será el cociente entre el área a calefactar y la distancia entre tubos, a la que se le añadirá el doble de la distancia ente el colector y el local a climatizar. Con el fin de no incrementar la pérdida de carga de la instalación se establece una longitud máxima por circuito de 120m. Si para alguno de los casos la distancia resultante de la división es superior, se dividirá en circuitos diferentes que, siempre que sea posible, tendrán la misma longitud para equilibrar las pérdidas de carga en ellos. En la tabla 6 se recoge la configuración y longitud de los distintos circuitos.

	CIRCUITO	RECINTO	S(m ²)	TRAZADO	PASO (cm)	LONGITUD (m)
Colector 1 CC1	C 1	BANO 1	3.46	Espiral	20	23.7
	C 2	HABITACION 2	9.98	Doble serpentín	20	55.7
	C 3	HABITACION 1	10.02	Doble serpentín	20	53.9
	C 4	SALON	12.56	Doble serpentín	20	73.5
	C 5	SALON	12.85	Doble serpentín	20	73.6
	C 6	SALON	13.18	Espiral	20	76.0
	C 7	COCINA	11.67	Doble serpentín	20	62.5
	C 8	COCINA	10.33	Doble serpentín	20	57.3
	C 9	COCINA	12.86	Doble serpentín	20	66.1
Colector 2 CC2	C 1	BANO 3	9.15	Espiral	20	53.4
	C 2	HABITACION 5	10.57	Doble serpentín	20	55.1
	C 3	BANO 2	5.82	Espiral	20	30.1
	C 4	HABITACION 5	10.29	Doble serpentín	20	53.6
	C 5	HABITACION 4	6.32	Espiral	20	35.9
	C 6	HABITACION 4	6.74	Espiral	20	37.9
	C 7	HABITACION 3	10.43	Espiral	20	59.2

Tabla 6: Circuitos emisores

El siguiente paso es determinar la curva característica que se define como la relación entre el flujo térmico de un sistema q y la desviación media de la temperatura aire-agua, $\Delta\theta_H$. Viene dada por la siguiente expresión:

$$q = K_H \cdot \Delta\theta_H$$

El proceso de cálculo de la constante de proporcionalidad, K_H , cuyo valor se establece en 4 W/(m²·K) para la instalación aquí diseñada, se recoge detalladamente en la norma UNE EN 1264 [12]. Su valor depende de las siguientes variables:

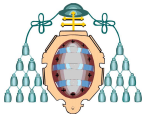
- Espesores y conductividades del revestimiento y del mortero de cemento.
- De la tubería: paso, diámetro exterior, espesor y conductividad.

La temperatura de ida de diseño se determina para la habitación que tenga el mayor flujo térmico de diseño (excluidos los cuartos de baño). Se supone que los revestimientos tienen una resistencia térmica uniforme en todas las habitaciones calentadas por el suelo. En la habitación de referencia, la caída de temperatura se toma menor o igual que 5K.

En la tabla 7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las temperaturas de impulsión y retorno.

Circuito	TEMPERATURAS DE IMPULSIÓN Y RETORNO							
	CASO BASE		BASE CON REC.		MEJORADO		MEJORADO PLUS	
	T° impul.	T° ret.	T° impul.	T° ret.	T° impul.	T° ret.	T° impul.	T° ret.
C1	38.8	35.8	35.2	28.9	34.0	27.3	31.6	25.8
C2	38.8	28.5	35.2	27.9	34.0	26.9	31.6	25.9
C3	38.8	26.1	35.2	25.4	34.0	24.7	31.6	23.8
C4	38.8	29.1	35.2	28.3	34.0	27.5	31.6	25.8
C5	38.8	29.1	35.2	28.3	34.0	27.5	31.6	25.8
C6	38.8	29.1	35.2	28.3	34.0	27.5	31.6	25.8
C7	38.8	33.8	35.2	30.2	34.0	29.0	31.6	26.6
C8	38.8	33.8	35.2	30.2	34.0	29.0	31.6	26.6
C9	38.8	33.8	35.2	30.2	34.0	29.0	31.6	26.6
C1	36.1	31.1	33.1	28.1	32.7	27.7	30.4	25.2
C2	36.1	28.8	33.1	27.7	32.7	25.7	30.4	25.4
C3	36.1	29.9	33.1	24.4	32.7	23.2	30.4	24.1
C4	36.1	28.8	33.1	27.7	32.7	25.7	30.4	25.4
C5	36.1	30.1	33.1	27.2	32.7	25.8	30.4	24.6
C6	36.1	30.1	33.1	27.2	32.7	25.8	30.4	24.6
C7	36.1	28.7	33.1	27.5	32.7	25.4	30.4	25.3

Tabla 7: Temperaturas de impulsión y retorno.



Determinadas las temperaturas de impulsión y retorno es inmediato determinar el caudal necesario para cada circuito.

$$m_H = \frac{A_F \cdot q}{\sigma \cdot C_{WV}} \cdot \left(1 + \frac{R_D}{R_U} + \frac{\theta_i - \theta_U}{q \cdot R_U} \right)$$

En esta expresión se incluyen las resistencias térmicas parciales ascendentes y descendentes del suelo, así como la Tª del recinto inferior para tener en cuenta la pérdida de calor hacia abajo, que serán de unos 18°C para los circuitos de la planta baja y de 21°C para los de la planta primera.

Determinado el caudal, el siguiente paso es determinar el diámetro de las tuberías teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Velocidad máxima = 2.0 m/s
- Pérdida de presión máxima por unidad de longitud = 40 mm.c.a./m

En la tabla 8 se recogen los resultados obtenidos, incluyendo el diámetro de las tuberías (tubería UPONOR Wirsbo-evalPEX 16x1,8 [13], en todos los casos), los caudales y la pérdida de carga, para los cuatro casos de estudio.

CAUDALES Y PÉRDIDA DE CARGA									
Circuito	Diámetro (mm)	CASO BASE		BASE CON REC.		MEJORADO		MEJORADO PLUS	
		Caudal (l/h)	AP (m.c.a.)	Caudal (l/h)	AP (m.c.a.)	Caudal (l/h)	AP (m.c.a.)	Caudal (l/h)	AP (m.c.a.)
C1	16	118.67	0.3	33.02	0.0	25.58	0.0	24.30	0.0
C2	16	63.93	0.3	77.19	0.4	67.37	0.3	71.81	0.3
C3	16	44.90	0.1	48.34	0.2	43.00	0.1	41.83	0.1
C4	16	89.33	0.6	106.98	0.8	96.57	0.7	88.61	0.6
C5	16	91.39	0.6	109.45	0.8	98.80	0.7	90.66	0.6
C6	16	93.70	0.7	112.22	0.9	101.30	0.8	92.95	0.7
C7	16	198.48	2.0	151.92	1.3	130.46	1.0	100.54	0.6
C8	16	175.66	1.5	134.45	0.9	115.46	0.7	88.98	0.5
C9	16	218.70	2.5	167.40	1.6	143.75	1.2	110.78	0.8
C1	16	143.79	1.0	111.07	0.6	106.49	0.6	75.17	0.3
C2	16	108.76	0.6	124.17	0.8	83.65	0.4	104.32	0.6
C3	16	67.17	0.2	28.97	0.0	22.65	0.0	33.72	0.0
C4	16	105.95	0.6	120.96	0.7	81.49	0.4	101.63	0.5
C5	16	75.68	0.2	59.05	0.1	44.53	0.1	41.88	0.1
C6	16	80.66	0.3	62.94	0.2	47.46	0.1	44.64	0.1
C7	16	97.42	0.6	109.05	0.7	70.75	0.3	88.86	0.5

Tabla 8: Caudales y pérdidas de carga.

MONTANTES Y TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN

Son la parte de la instalación que, partiendo de la bomba de calor, alimenta a los colectores distribuidores de suelo radiante. La distribución se realiza mediante una única columna con derivaciones a los colectores. Los resultados se recogen en la tabla 9.

TRAMO	GENERADOR-COLECTOR 1	COLECTOR 1-COLECTOR 2	COLECTOR 2-COLECTOR 1	COLECTOR 1-GENERADOR
Tipo	Impulsión	Impulsión	Retorno	Retorno
Longitud	6	2,7	2,7	6
BASE SIN RECUPERADOR				
Caudal (m3/h)	1,77	0,68	0,68	1,77
Diámetro (mm)	40	32	32	40
Espesor	3,7	2,9	2,9	3,7
V (m/s)	0,59	0,35	0,35	0,59
AP (mm.c.a./m)	17	9	9	17
AP (mm.c.a.)	103	54	54	103
BASE CON RECUPERADOR				
Caudal (m3/h)	1,56	0,62	0,62	1,56
Diámetro (mm)	32	25	25	32
Espesor	2,9	2,3	2,3	2,9
V (m/s)	0,80	0,53	0,53	0,80
AP (mm.c.a./m)	39	25	25	39
AP (mm.c.a.)	233	152	152	233
MEJORADO				
Caudal (m3/h)	1,28	0,46	0,46	1,28
Diámetro (mm)	32	25	25	32
Espesor	2,9	2,3	2,3	2,9
V (m/s)	0,66	0,39	0,39	0,66
AP (mm.c.a./m)	27	15	15	27
AP (mm.c.a.)	165	90	90	165
MEJORADO PLUS				
Caudal (m3/h)	1,2	0,49	0,49	1,2
Diámetro (mm)	32	25	25	32
Espesor	2,9	2,3	2,3	2,9
V (m/s)	0,62	0,42	0,42	0,62
AP (mm.c.a./m)	25	17	17	25
AP (mm.c.a.)	147	101	101	147

Tabla 9: Tuberías de distribución.

Para el dimensionamiento de las tuberías se han tenido en cuenta las mismas restricciones que en los circuitos emisores, tanto de velocidad como de pérdida de carga.

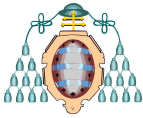
Se emplean las tuberías de distribución Uponor [12] Wirsbo-evalPEX de 25, 32 y 40mm de diámetro exterior y espesores de 2,3, 2,9 y 3,7mm respectivamente.

GRUPO DE IMPULSIÓN

Se encarga de proporcionar el caudal de agua preciso a la temperatura precisa para el correcto funcionamiento de la instalación mediante la mezcla de agua del generador de calor y agua de retorno de suelo radiante en una válvula de 3 vías.

El grupo de impulsión seleccionado es el "Grupo de Impulsión Uniset T1" de Uponor [13] que cuenta con la bomba de impulsión UPS 25-60 que permite la selección de tres posibles velocidades de funcionamiento (I, II o III).

La bomba se selecciona entrando en el gráfico de curvas características y seleccionando la velocidad que quede por encima del punto característico de funcionamiento de la instalación que viene determinado por el caudal y la pérdida de carga máxima. En todos los casos de estudio el circuito



que acumula una mayor pérdida de carga es el C9, perteneciente al colector ubicado en la planta baja. La curva característica del grupo de impulsión se recoge la figura 8.

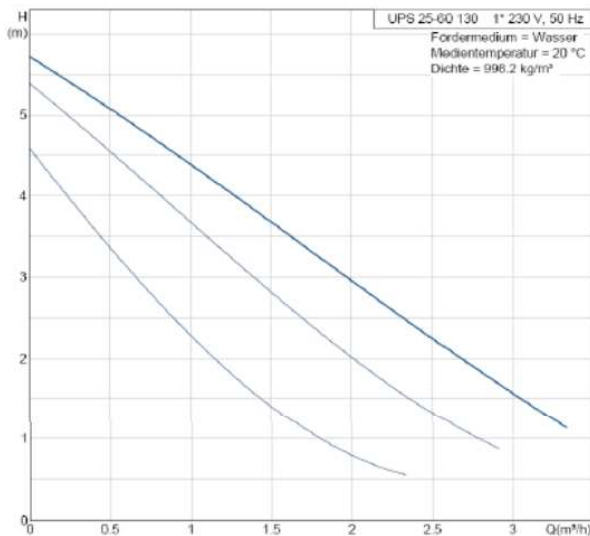


Figura 8: Curva característica UPS 25-60.

El caudal y la presión que la bomba debe suministrar así como la velocidad de funcionamiento se muestran en la tabla 10.

	CASO BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Caudal (m³/h)	1,77	1,56	1,28	1,2
AP (mca)	2,7	2,0	1,5	1,1
Bomba UPS 25-60	III	II	I	I

Tabla 10: Selección bomba de circulación.

SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

En cada local se instala un termostato que envía señales por cable o radio a un módulo de control que hace de interface entre el sistema y el usuario. En el módulo de regulación se analizan las señales recibidas y, en función de éstas, controla los cabezales electrotérmicos y la bomba circuladora.

COLECTORES

Los colectores de impulsión llevan acoplados detentores, uno por circuito, con el fin de realizar el equilibrado hidráulico de la instalación durante su puesta en marcha. Para regular independientemente el aporte térmico a cada local calefactado se necesita colocar unos cabezales electrotérmicos sobre cada salida del colector de

retorno. De este modo se realiza un control del caudal entrante a cada circuito en función de la señal del correspondiente termostato.

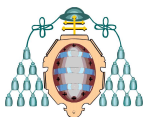
6. ANÁLISIS ENERGÉTICO

A continuación se procede a realizar una estimación de la demanda térmica anual de calefacción de la vivienda. El software *CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)* [9] empleado para la determinación de la carga térmica, ofrece la posibilidad de exportar los datos introducidos a *EnergyPlus™* [10], software de libre distribución de simulación térmica y energética de edificios desarrollado por DOE (Department of Energy, Estados Unidos) con el que se pueden hacer estudios de demanda y consumo energético.

Calculada la demanda anual de calefacción requerida por la vivienda y tomando un COP medio estacional de 2,7 [14], en los cuatro casos de estudio, se determina el consumo eléctrico de calefacción.

Además, habrá que considerar los consumos de los equipos de ventilación que serán diferentes en cada caso. El sistema de ventilación para el *caso base* se compone de un extractor de 220w. En el resto de los casos, el propio recuperador de calor incorpora los ventiladores tanto de impulsión como de retorno. El modelo seleccionado es el *LG500 System Ventech* [15], del fabricante *Pichler*, con certificado *Passivhaus* [5] apto para trabajar con rangos de caudales desde 100 a 550 m³/h. Permite la regulación de velocidad (4 velocidades) en función del caudal a extraer. Para el *caso base con recuperador* con unos requerimientos de ventilación de 413 m³/h, el consumo se establece en unos 210w (4ª velocidad). Para los *casos mejorado y mejorado plus*, 210m³/h, se reduce a unos 50 w (1ª velocidad). Teniendo en cuenta que el sistema de ventilación funcionará de forma ininterrumpida durante todo el año se determinará para cada caso el consumo eléctrico anual por este concepto.

Los resultados obtenidos para los casos de estudio se muestran en la tabla 11.



DEMANDA TÉRMICA ANUAL				
	BASE SIN REC.	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Por superficie (kwh/m ²)	111,06	52,64	34,62	26,48
Total (kwh)	22277,66	10560,50	6945,50	5311,21
Ahorro (kwh)	0,00	11717,17	15332,16	16966,45
Ahorro (%)	0,00	52,60	68,82	76,16

CONSUMO ELÉCTRICO ANUAL				
	BASE SIN REC.	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
COP estacional	2,7	2,7	2,7	2,7
Calefacción (kwh)	8250,99	3911,30	2572,41	1967,12
Ventilación (kwh)	1928,08	1840,44	438,2	438,2
Total (kwh)	10179,07	5751,74	3010,61	2405,32
Ahorro (kwh)	0,00	4427,33	7168,46	7773,75
Ahorro (%)	0,00	43,49	70,42	76,37

Tabla 11: Análisis energético

La reducción del consumo eléctrico a medida que se van incorporando las medidas de mejora es evidente. Destaca sobre todas el importante ahorro que supone la recuperación de calor, que supone una reducción de los consumos de un 43,49%.

Resaltar también que para el caso mejorado plus, se obtiene una demanda de 26,48 kwh/m², valor cercano pero no suficiente para cumplir el objetivo *Passivhaus* [5] de 15 kwh/m².

7. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se valorarán los costes de la instalación de suelo radiante y de ventilación para todos los casos, y de las propuestas de mejora de la envolvente térmica del edificio, cerramientos y huecos, en los casos que proceda. Para ello se ha utilizado el generador de precios de CYPE Ingenieros [9] que tiene en cuenta las características concretas de cada obra para generar precios específicos para el proyecto que se está presupuestando. Esto nos permitirá estimar los sobrecostes que suponen la adopción de las medidas de mejora propuestas para cada uno de los casos de estudio en relación al *caso base sin recuperación de calor*.

En la tabla 12 se muestran los costes asociados a las instalaciones de calefacción y ventilación, mejora de la envolvente y huecos.

Obviamente, a medida que se van incorporando más medidas de mejora la inversión también se va incrementando. La implementación de todas las medidas de mejora, *caso mejorado plus*, suponen un sobrecoste del 32,46% en relación al *caso base*.

INVERSIÓN INICIAL				
INSTALACION DE CALEFACCION				
	BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Bomba de calor	6444,06	5695,62	5.205,97	4706,88
Impulsión y distribución	1549,69	1549,69	1.461,75	1.461,75
Circuitos emisores	12305,02	12305,02	12.305,02	12305,02
Total	20298,77	19550,33	18972,74	18473,65

INSTALACION DE VENTILACION				
	BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Recuperador	0	3765,08	3765,08	3765,08
Conductos y rejillas	2498,54	3149,63	3.100,44	3100,44
Total	2498,54	6914,71	6865,52	6865,52

MEJORA DE LA ENVOLVENTE				
	BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Aislamiento muros	735,494	735,494	2206,482	2206,482
Aislamiento forjados	1007,307	1007,307	2014,614	2014,614
Aislamiento Cubierta	2159,40	2159,40	4318,80	4318,80
Total	3902,20	3902,20	8539,90	8539,90

MEJORA DE VENTANAS				
	BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Carpintería exterior	5831,39	5831,39	5831,39	7480,81
Vidrios	908,3	908,3	908,3	2.934,37
Total	6739,69	6739,69	6739,69	10415,18

TOTAL INVERSION INICIAL				
	BASE	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Inversión total	33439,20	37106,93	41117,85	44294,25
Sobrecoste	0,00	3667,73	7678,65	10855,05
Sobrecoste (%)	0,00	10,97	22,96	32,46

Tabla 12: Valoración de los costes de las actuaciones

También se estudiarán los costes de explotación previstos a partir del consumo eléctrico del edificio y precio de la energía eléctrica, 0,14 c€/kwh [16] tomando un incremento anual del 4%. El ahorro obtenido en los costes de explotación nos permitirá establecer el ritmo de amortización de las actuaciones planteadas.

COSTE EXPLOTACIÓN				
	Base	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Demanda eléctrica (kwh)	10179	5752	3011	2405
Coste año 1 (€)	1425	805	421	337

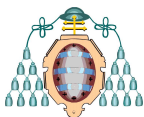
AMORTIZACIÓN				
	0	6	7	9
Amortización (años)	0	6	7	9
Ahorro 20 años (€)	0	14789,51	22206,16	21553,18

Tabla 13: Costes de explotación y amortización

Los plazos de amortización de los sobrecostes que suponen las medidas de mejora planteadas son de unos 6 años para la instalación del recuperador de calor (ver figura 9).

Si a esta medida se le añade un aumento en el espesor del aislamiento el periodo de amortización de la actuación asciende a 7 años, si bien al cabo de 20 años el ahorro conseguido es mayor (ver figura 10).

La última de las opciones, que incluye todas las medidas de mejora recogidas en los dos casos



anteriores más la instalación de unas ventanas de altas prestaciones térmicas, el plazo asciende a los 9 años (ver figura 11).

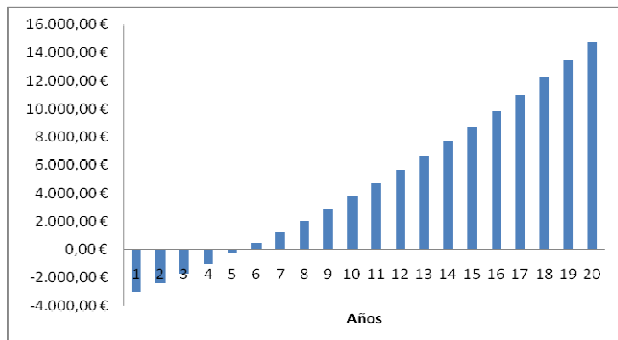


Figura 9: Amortización en el caso base con recuperador

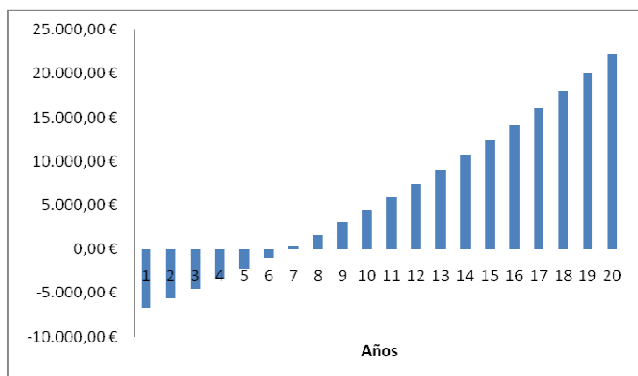


Figura 10: Amortización en el caso mejorado

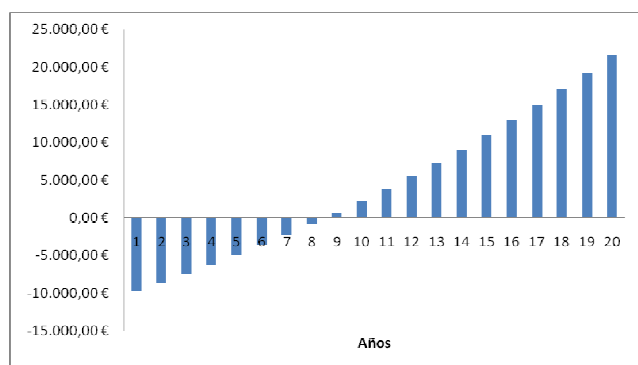


Figura 11: Amortización en el caso mejorado plus

8. ESTUDIO AMBIENTAL

En este punto se pretende poner de manifiesto que las medidas de ahorro energético propuestas en los casos analizados, no solo suponen un importante ahorro económico al usuario, sino que contribuyen de forma significativa a reducir

las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Entre ellos cabe destacar el CO₂ que es un gas de efecto invernadero.

En el caso que nos atañe, para satisfacer las necesidades de calor de la vivienda, se emplea una bomba de calor por lo que habrá que evaluar el consumo eléctrico anual para determinar las emisiones de CO₂ producidas. Las emisiones específicas medias de CO₂ del sistema eléctrico peninsular durante el año 2012 fueron de 241 gCO₂/kwh [17].

	EMISIONES DE CO ₂			
	Base	BASE CON REC.	MEJORADO	MEJORADO PLUS
Consumo (kwh)	10179,07	5751,74	3010,61	2405,32
Emisiones T CO ₂	2,45	1,39	0,73	0,58
T CO ₂ evitadas	0,00	1,07	1,73	1,87
Reducción (%)	0,00	43,49	70,42	76,37

Tabla 14: Emisiones de CO₂

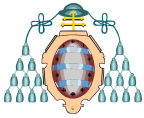
La aplicación de las medidas de mejora suponen una importante reducción de las emisiones de CO₂. En el caso base, las emisiones totales se estiman en torno a las 2,45 toneladas de CO₂ anuales. La aplicación de las medidas de mejora de eficiencia suponen una reducción de las emisiones con respecto al caso base del 43,49 %, 70,42% y 76,37% para los *casos base con recuperación de calor, mejorado y mejorado plus*, respectivamente.

9. CONCLUSIONES

Los altos requerimientos de caudal de ventilación recogidos en el CTE [3], suponen que una importante parte de la energía necesaria para mantener las condiciones de confort dentro de las viviendas sea para el acondicionamiento de este aire de ventilación. Es por ello que la instalación de un recuperador de calor es una de las medidas más interesantes, produciéndose una reducción de hasta un 43,49% de la demanda energética con un plazo de amortización de unos 6 años.

La reducción de los caudales de ventilación a los estándares *Passivhaus* [5], aplicado conjuntamente con la recuperación de calor y el aumento del aislamiento, suponen en conjunto una reducción de la demanda de un 70,42%. El plazo previsto de amortización de estas actuaciones asciende a 7 años.

Si a esto le añadimos una mejora de las características térmicas de las ventanas, la



demanda específica adquiere un valor de 26,48 kWh/m²/año, valor cercano pero no suficiente para cumplir el objetivo *Passivhaus* [5] de 15 kWh/m²/año. En este caso, la reducción de la demanda es de un 76,37% y la amortización se completa en un plazo de unos 9 años.

Poner de manifiesto también que la aplicación conjunta de todas las medidas de mejora supone una reducción de la carga térmica de un 55,62%, lo que repercute de forma importante en las instalaciones de calefacción necesarias, con lo que parte de los sobrecostos que estas actuaciones suponen se ven en parte compensadas.

NOMENCLATURA

A_F : Superficie de la zona de calefacción, en m².

c_w : Calor específico del agua, en kJ/(kg · K).

K_H : Coeficiente de transmisión térmica equivalente representada por el gradiente de la curva característica, en W/ (m²·K).

m_H : Caudal de diseño del fluido calefactor, en kg/s

q : Potencia térmica específica, en W/m².

R_o : Resistencia térmica parcial ascendente de la estructura del suelo, en m²·K/W.

R_u : Resistencia térmica parcial descendente de la estructura del suelo, en m²·K/W.

$\theta_{F,m}$: Temperatura media de superficie, en °C.

θ_i : Temperatura ambiente interior estándar, en °C.

θ_U : Temperatura en una sala bajo el suelo de la sala calentada, en °C.

$\Delta\theta_H$: Diferencia de temperatura entre el fluido de calefacción y la sala, en °C.

σ : Descenso de la temperatura del fluido de calefacción, en °C

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a D^a Inés Suárez Ramón y D^a María Manuela Prieto González su inestimable ayuda para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] IDAE. Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España.

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf

[2] DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:ES:PDF>

[3] CTE. Código Técnico de la Edificación. <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/>

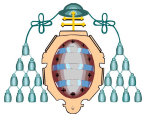
[4] DIRECTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE

<http://www.boe.es/doue/2012/315/L00001-00056.pdf>

[5] Guía del estándar passivhaus. Edificios de consumo casi nulo. Comunidad de Madrid.

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Estandar-Passivhaus-fenercom-2011.pdf>

[6] REAL DECRETO 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.



<http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

[7] AENOR. Climatización. Condiciones climáticas para proyectos. UNE 100001:2001

[8] AENOR. Sistemas de calefacción en edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño. UNE-EN 12831:2003

[9] CYPECAD MEP (Instalaciones del edificio)
<http://descargas.cype.es/>

[10] EnergyPlus Energy Simulation Software.
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

[11] Ferroli. Manual Tecnico_RVL_I_IT.
<http://www.ferroli.es/aire-acondicionado/bombacalor/uso-profesional/RVL-I/>

[12] AENOR. Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. UNE-EN 1264

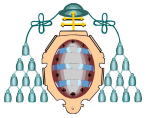
[13] UPONOR. Climatización invisible residencial. Manual técnico para instalaciones de calefacción y refrigeración por suelo.
http://www.uponor.es/~media/Files/Uponor/Spain/Manuales%20Tecnicos/Climatizacion%20Invisible/MT_CI1%20RESIDENCIAL%202009b.ashx

[14] DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 1 de marzo de 2013 por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, conforme a lo dispuesto en el artículo 5 de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=DOUE-L-2013-80420

[15] LG500 System Ventech.
<http://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsDoc/PDF/Documentation/ADS/HU/Technical/LG%20500%20kompakt.pdf>

[16] Resolución de 26 de junio de 2013, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se revisa el coste de producción de energía eléctrica y las tarifas de último recurso a aplicar a partir de 1 de julio de 2013.
<http://www.boe.es/boe/dias/2013/06/29/pdfs/BOE-A-2013-7064.pdf>

[17] OCCC, Observatorio de la electricidad.
http://awsassets.wwf.es/downloads/observatorio_junio_2013.pdf



ANEXO 1: BOMBA DE CALOR AIRE-AGUA FERROLI RVL. Curvas de potencia y COP.

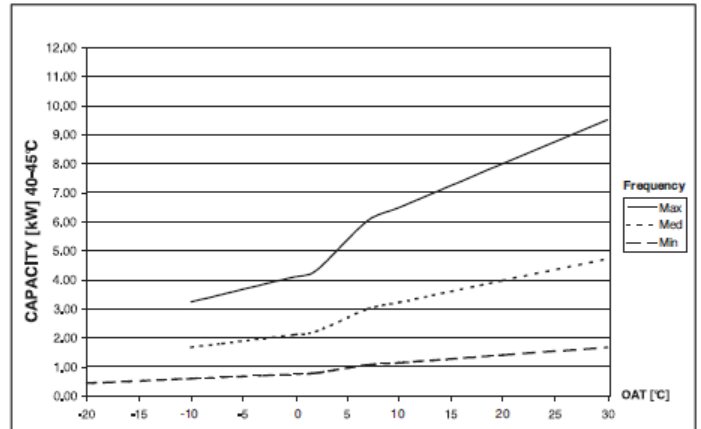
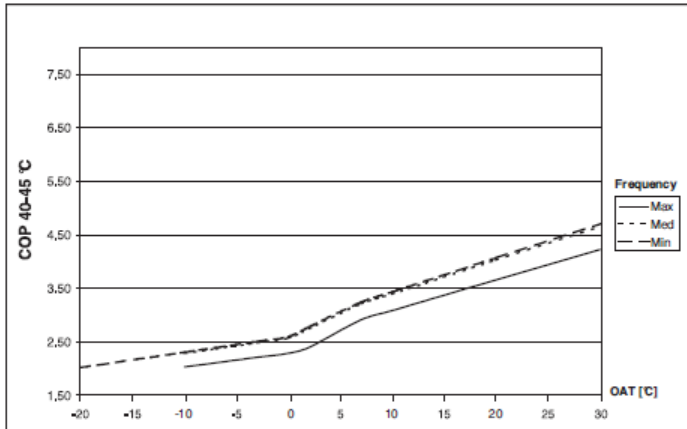


Figura 1: Curvas de potencia y COP para el modelo RVL06.

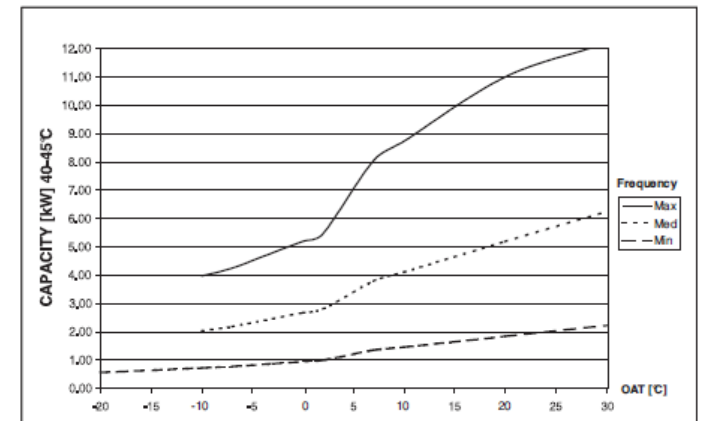
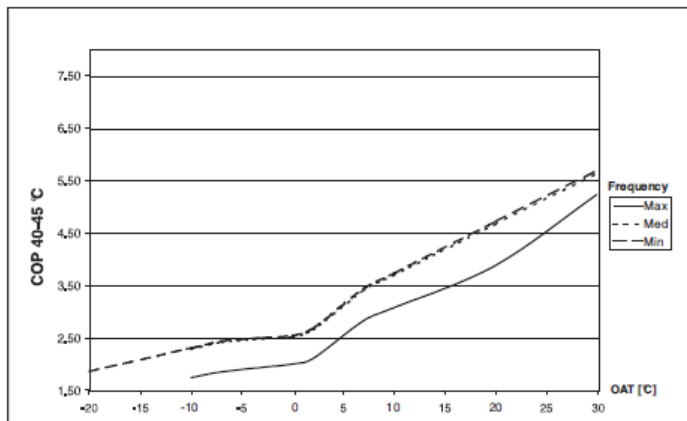


Figura 2: Curvas de potencia y COP para el modelo RVL08.

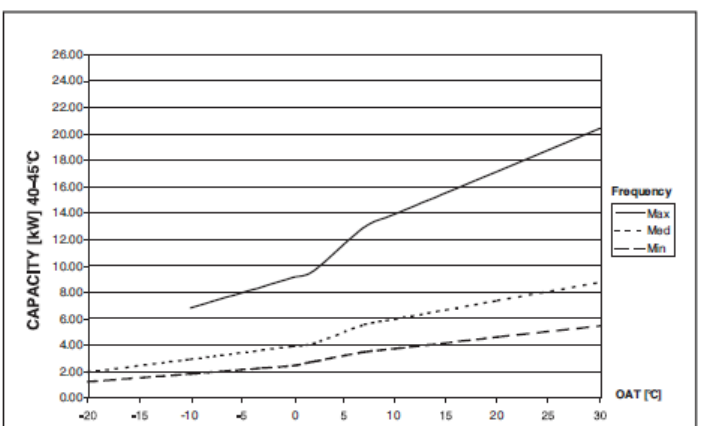
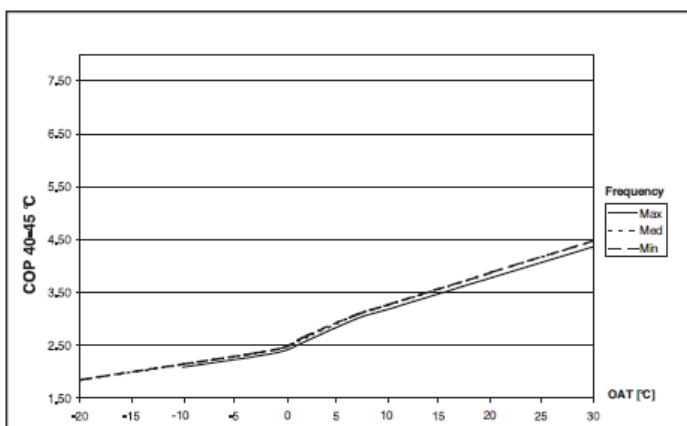


Figura 3: Curvas de potencia y COP para el modelo RVL12.

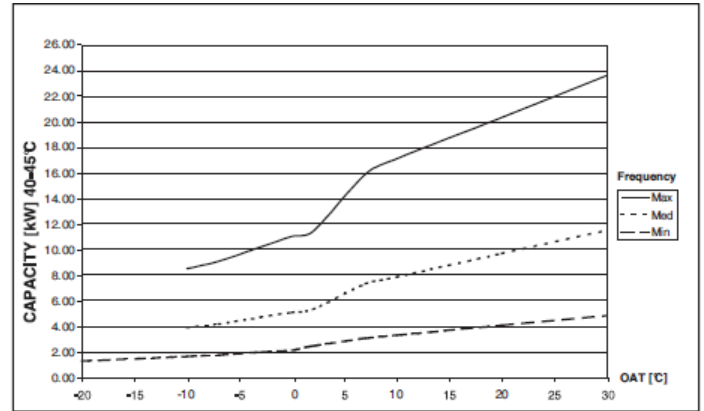
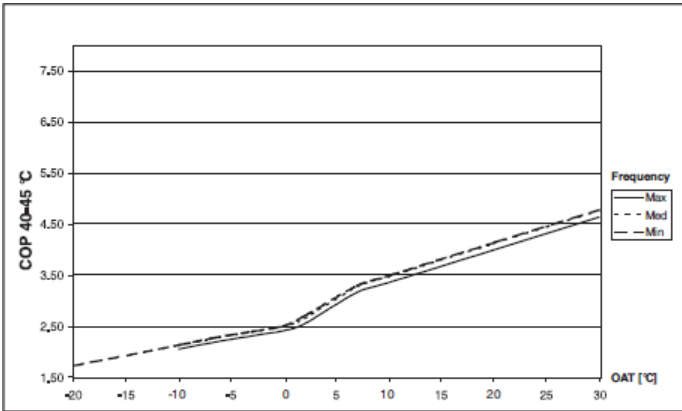
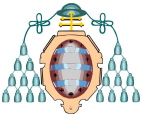


Figura 4: Curvas de potencia y COP para el modelo RVL14.