

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño de climatización, mediante geotermia de muy baja entalpía, de vivienda unifamiliar aislada, situada en la urbanización Ausiàs March II de Carlet (Valencia)

Presentado por

Alba Vidagany Iborra

Para la obtención de

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos



Curso: 2017/2018

Fecha: Septiembre 2018

Tutor: Luis Oria Doménech



ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO Nº 1: MEMORIA Y ANEJOS

1. INTRODUCCIÓN

2. ANTECEDENTES

3. GEOTERMIA

- 3.1 Que es la geotermia
- 3.2 Fundamentos de la geotermia
 - 3.2.1 Gradiente geotérmico
 - 3.2.2 Recurso geotérmico
 - 3.2.3 Flujo de calor
 - 3.2.4 Estimación de la temperatura del terreno
- 3.3 Normativa

4. INSTALACIÓN GEOTÉRMICA

- 4.1 Sistemas de captación
 - 4.1.1 Intercambiadores de calor
 - 4.1.2 Fluido caloportador
 - 4.1.3 Sondeos geotérmicos
 - 4.1.4 Sondos geotérmicas
 - 4.1.5 Relleno del sondeo
 - 4.1.6 Aprovechamiento energético de las infraestructuras y obras subterráneas
- 4.2 Bomba de calor
- 4.3 Sistemas de distribución
 - 4.3.1 Suelo radiante
 - 4.3.2 Radiadores de baja temperatura
 - 4.3.3 Fan-coils
 - 4.3.4 Radiadores convencionales

5. CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO

- 5.1 Ubicación de la vivienda y relieve
- 5.2 Geología

6. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

7. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA VIVIENDA

- 7.1 Orientación
- 7.2 Zona climática
- 7.3 Cerramientos exteriores
- 7.4 Particiones interiores
- 7.5 Suelo
- 7.6 Huecos



- 7.6.1 Ventanas
- 7.6.2 Puerta exterior
- 7.7 Cubierta
- 7.8 Puentes térmicos
- 8. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA**
- 9. CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DE LA VIVIENDA**
 - 9.1 Cálculo de la demanda máxima de calefacción
 - 9.1.1 Carga térmica por transmisión
 - 9.1.2 Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior
 - 9.1.3 Pérdidas de calor totales
 - 9.2 Cálculo de la demanda máxima de refrigeración
 - 9.2.1 Carga térmica por transmisión
 - 9.2.2 Cargas térmicas por radiación solar
 - 9.2.3 Carga sensible por ventilación o infiltración de aire exterior
 - 9.2.4 Ganancias de calor totales
 - 9.3 Resumen de los cálculos de la demanda térmica máxima
- 10. ELECCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR**
 - 10.1 Determinación de la bomba de calor
 - 10.2 Fluido refrigerante
- 11. ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DEL TERRENO**
- 12. DIMENSIONAMIENTO DEL SONDEO**
 - 12.1 Sondos geotérmicas
 - 12.2 Fluido caloportador
 - 12.3 Longitud en profundidad de los sondeos
 - 12.3.1 Temperaturas máximas y mínimas de la tierra
 - 12.3.2 Temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor
 - 12.3.3 Diferencia de temperaturas entre el circuito y el suelo
 - 12.3.4 Resistencia de los tubos al flujo de calor
 - 12.3.5 Resistencia de la tierra
 - 12.3.6 Factor de utilización
 - 12.3.7 Longitud del intercambiador enterrado
 - 12.4 Relleno
- 13. SOLDADURA DE TUBOS DE POLIETILENO**
 - 13.1 Ventajas de la soldadura por electrofusión
 - 13.2 Causas de error de la soldadura por electrofusión
- 14. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA**
 - 14.1 Pruebas de presión y purgado en el intercambiador
- 15. PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS**
 - 15.1 Limpieza y purga del sistema



15.2 Pruebas de estanqueidad y resistencia de la instalación

15.3 Puesta en marcha de la bomba de calor

16. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE SUELO RADIANTE

16.1 Temperatura del agua

16.1.1 Cálculo del coeficiente de transmisión térmica

16.1.2 Calefacción

16.2 Temperatura de refrigeración

17. CONCLUSIONES

18. BIBLIOGRAFÍA

ANEJOS:

Anejo nº 01: Características geológicas y climáticas de Carlet

Anejo nº 02: Cálculo de la demanda energética

Anejo nº 03: Fundamentos de la bomba de calor

DOCUMENTO Nº 2: PLANOS

1. SITUACIÓN
2. PLANTA DE DISTRIBUCIÓN
3. CUBIERTA
4. ALZADOS
5. PERFORACIONES

DOCUMENTO Nº 3: PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO Nº 4: PRESUPUESTO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño de climatización, mediante geotermia de muy baja entalpía, de vivienda unifamiliar aislada, situada en la urbanización Ausiàs March II de Carlet (Valencia)

DOCUMENTO Nº 1: MEMORIA Y ANEJOS

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. ANTECEDENTES	8
3. GEOTERMIA	9
3.1 Que es la geotermia	9
3.2 Fundamentos de la geotermia	11
3.2.1 Gradiente geotérmico	11
3.2.2 Recurso geotérmico	11
3.2.3 Flujo de calor	12
3.2.4 Estimación de la temperatura del terreno	12
3.3 Normativa	14
4. INSTALACIÓN GEOTÉRMICA	16
4.1 Sistemas de captación	16
4.1.1 Intercambiadores de calor	16
4.1.2 Fluido caloportador	19
4.1.3 Sondeos geotérmicos	19
4.1.4 Sondas geotérmicas	21
4.1.5 Relleno del sondeo	21
4.1.6 Aprovechamiento energético de las infraestructuras y obras subterráneas	22
4.2 Bomba de calor	23
4.3 Sistemas de distribución	25
4.3.1 Suelo radiante	25
4.3.2 Radiadores de baja temperatura	26
4.3.3 Fan-coils	26
4.3.4 Radiadores convencionales	27
5. CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO	28
5.1 Ubicación de la vivienda y relieve	28
5.2 Geología	28
6. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA	29
7. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA VIVIENDA	30
7.1 Orientación	30
7.2 Zona climática	31
7.3 Cerramientos exteriores	31
7.4 Particiones interiores	32
7.5 Suelo	32
7.6 Huecos	33
7.6.1 Ventanas	33



7.6.2	Puerta exterior	33
7.7	Cubierta	33
7.8	Puentes térmicos.....	33
8.	DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA.....	35
9.	CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DE LA VIVIENDA.....	36
9.1	Cálculo de la demanda máxima de calefacción	37
9.1.1	Carga térmica por transmisión	37
9.1.2	Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior	38
9.1.3	Pérdidas de calor totales	38
9.2	Cálculo de la demanda máxima de refrigeración	38
9.2.1	Carga térmica por transmisión	39
9.2.2	Cargas térmicas por radiación solar.....	39
9.2.3	Carga sensible por ventilación o infiltración de aire exterior	40
9.2.4	Ganancias de calor totales	40
9.3	Resumen de los cálculos de la demanda térmica máxima	40
10.	ELECCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR	42
10.1	Determinación de la bomba de calor.....	42
10.2	Fluido refrigerante	42
11.	ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DEL TERRENO	44
12.	DIMENSIONAMIENTO DEL SONDEO	45
12.1	Sondas geotérmicas.....	45
12.2	Fluido caloportador.....	45
12.3	Longitud en profundidad de los sondeos	46
12.3.1	Temperaturas máximas y mínimas de la tierra	46
12.3.2	Temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor... 47	
12.3.3	Diferencia de temperaturas entre el circuito y el suelo	47
12.3.4	Resistencia de los tubos al flujo de calor	47
12.3.5	Resistencia de la tierra	47
12.3.6	Factor de utilización.....	48
12.3.7	Longitud del intercambiador enterrado.....	53
12.4	Relleno	54
13.	SOLDADURA DE TUBOS DE POLIETILENO.....	55
13.1	Ventajas de la soldadura por electrofusión	55
13.2	Causas de error de la soldadura por electrofusión	55
14.	VERIFICACIÓN DEL SISTEMA	56
14.1	Pruebas de presión y purgado en el intercambiador	56
15.	PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS.....	57
15.1	Limpieza y purga del sistema.....	57
15.2	Pruebas de estanqueidad y resistencia de la instalación	59



15.3	Puesta en marcha de la bomba de calor	59
16.	DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE SUELO RADIANTE	60
16.1	Temperatura del agua	62
16.1.1	Cálculo del coeficiente de transmisión térmica	63
16.1.2	Calefacción	63
16.2	Temperatura de refrigeración	64
17.	CONCLUSIONES	66
18.	BIBLIOGRAFÍA	67



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es el diseño de una instalación geotérmica para climatizar una vivienda unifamiliar, de manera que el aporte de energía no renovable sea el mínimo para conseguir las condiciones de confort óptimas para todos los ocupantes durante todo el año.

En este dimensionamiento, se incluyen los sondeos geotérmicos y el equipo de bomba de calor, teniendo en cuenta el aporte de energía solar pasiva y el uso de aislantes térmicos a lo largo de la envolvente para la reducción de las necesidades de energía.

Para ello, se determinará el modelo de bomba de calor geotérmica más adecuado en función de las demandas de calefacción y refrigeración, así como el número de sondeos geotérmicos necesarios y su profundidad.



2. ANTECEDENTES

La eficiencia energética, con respecto a un edificio, puede definirse como la reducción de la energía consumida para obtener las mismas condiciones de confort en las estancias. Esto es, en la medida que el consumo de energía por unidad de producto o de servicio prestado sea cada vez menor, aumenta la eficiencia energética. Una disminución del consumo de energía supone una reducción del consumo de los recursos.

El continuo aumento de la población supone un problema con respecto al abastecimiento de todo tipo de recursos ya que éstos son limitados y la tendencia es que la demanda aumente cada vez más.

En cuanto a los recursos energéticos, su procedencia ha variado a lo largo del tiempo, de manera que los tiempos de transición entre el reemplazo de una fuente de energía por otra es de unos 40 años.

Actualmente, el 80% de los recursos consumidos proceden de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). La sociedad poco a poco empieza a ser consciente de la necesidad de la explotación sostenible de los recursos, del respeto al medio ambiente y del ahorro a la hora de utilizar dichos recursos. Es por ello, por lo que los países desarrollados tienden cada vez más a la inversión en energía renovables y a llevar a cabo prácticas de eficiencia energética que supongan una disminución de la energía consumida.

Es cierto que la inversión inicial es más elevada en tecnologías energéticamente eficientes, pero ésta se compensará posteriormente con el consumo durante el tiempo de vida de la instalación.

Por otra parte, la demanda de energía de los edificios depende de muchas variables entre las que destacan la zona climática y el tipo de edificio, siendo las viviendas unifamiliares las que mayor consumo energético unitario tienen. En la ilustración 1, se muestran los servicios o usos que más energía consumen de media en viviendas unifamiliares. Cabe destacar, que el mayor consumo se da en calefacción, por lo que resulta interesante la instalación de una fuente de energía alternativa que abastezca esta gran demanda.

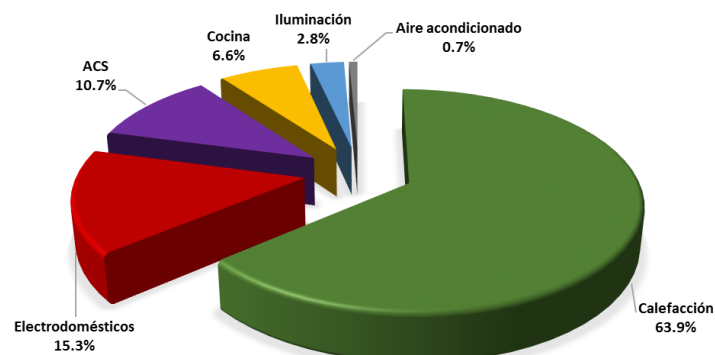


Figura 1: Estructura de consumo medio según usos energéticos en vivienda unifamiliar



3. GEOTERMIA

3.1 Que es la geotermia

La energía geotérmica es la energía calorífica que la tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre. Es una fuente inagotable de energía los 365 días del año las 24 horas al día, y a diferencia de otros sistemas no influyen las condiciones meteorológicas del momento (sol, viento, etc.).

La energía geotérmica es, por tanto, una forma de aprovechamiento energético sostenible con presente y futuro, tanto desde el punto de aprovisionamiento energético de elevadas garantías, como desde el punto de vista térmico, como alternativa de alta eficiencia energética frente a los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración.

La energía geotérmica es capaz de abastecer hasta el 100% de las necesidades de calefacción y de agua caliente sanitaria (A.C.S) de una vivienda, edificio, etc., incluso con temperaturas exteriores muy bajas, proporcionando además refrigeración en verano, todo ello con una misma instalación.

La energía geotérmica de baja entalpía es una energía renovable que elimina la dependencia de los combustibles fósiles (gasoil, gas natural y propano) con la consiguiente disminución de emisiones de CO₂, causantes del efecto invernadero. Esta energía es respetuosa con el medio ambiente y tiene un nulo impacto ambiental, ya que los intercambiadores de calor están situados en el terreno o en las propias cimentaciones de los edificios.

Hasta ahora, la utilización de la energía geotérmica en el mundo ha estado limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas eran muy favorables. Pero los avances tecnológicos actuales en equipos y las mejoras en la prospección y perforación, permiten a la geotermia a día de hoy disponer de tecnología para la producción de energía a partir de recursos geotérmicos de temperaturas notablemente inferiores a las que se precisaban años atrás.

Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía. Como la entalpía es difícil de cuantificar y es más o menos proporcional a la temperatura, la práctica habitual ha generalizado la clasificación de los principales usos de energía geotérmica en función de la temperatura, tal y como se muestra en la figura 2.

Así pues, se establecen cuatro categorías para la energía geotérmica:

- Alta entalpía: Corresponde a una temperatura superior a 150° C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica
- Media entalpía: Rango entre 90° C y 150° C. Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales
- Baja entalpía: Rango entre 30 y 90° C. Su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas



- **Muy baja entalpía:** Corresponde a una temperatura inferior a 30° C. Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor. Se aprovecha la energía del terreno existente en rocas y en el agua del subsuelo, tanto en la zona no saturada como en la saturada

Así pues, el rango de temperaturas, en el que se centra este trabajo, se aproxima a la geotermia de baja entalpía.

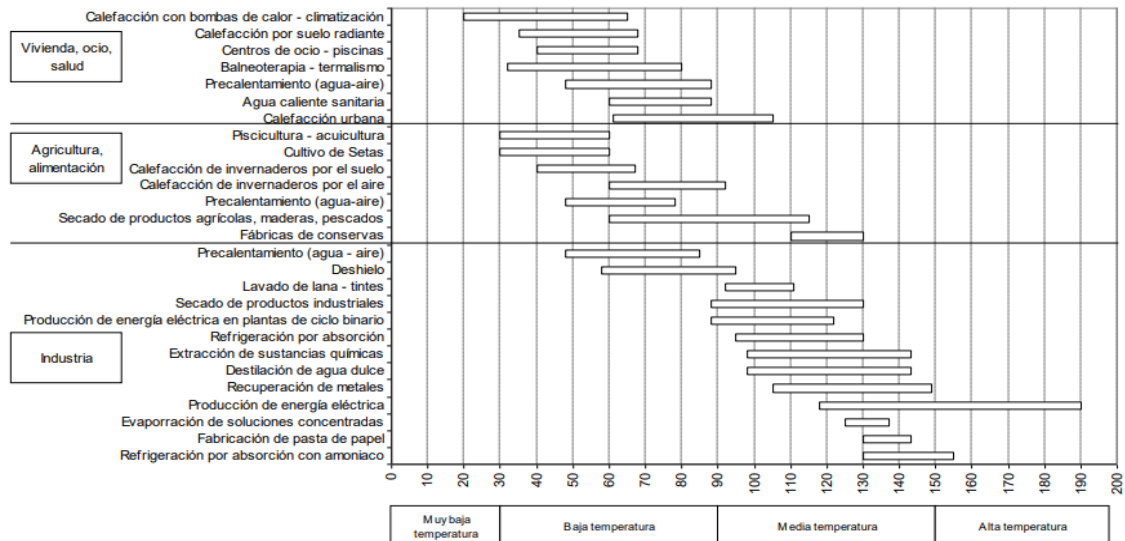


Figura 2: Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura

Las ventajas que presenta esta energía renovable son:

- Es una fuente de energía inagotable
- Su aprovechamiento es permanente. La energía geotérmica no se ve afectada por los cambios estacionales ni por las condiciones climáticas del exterior
- Los costes de mantenimiento no son costosos
- Sistema de gran ahorro energético y económico
- Las instalaciones geotérmicas tienen una vida útil superior a los 50 años
- Los residuos producidos son mínimos y ocasionan menos impacto ambiental que los residuos de combustibles fósiles
- Sistema silencioso combinable a otro tipo de energías renovables
- Flexibilidad de ubicación
- Instalación estética. La mayor parte del circuito se encuentra bajo tierra

Pero a su vez, presenta algunos inconvenientes:

- En circuitos abiertos de aguas freáticas existe una ligera contaminación térmica
- Incapacidad de transporte como energía primaria
- Alto coste de instalación. Se requiere de un estudio previo y una gran cantidad de material



3.2 Fundamentos de la geotermia

3.2.1 Gradiente geotérmico

El calor anteriormente descrito, se manifiesta al penetrar hacia las partes interiores de la Tierra, en forma de incremento de temperatura. Este incremento de temperatura es lo que se conoce como gradiente geotérmico.

Así, la temperatura del suelo por debajo de 5 metros es de aproximadamente 15°C, independientemente de las condiciones meteorológicas de la superficie o estación del año. Entre los 15 y 20 metros de profundidad y en función de la situación geográfica, la estabilidad térmica es de unos 17 °C. Esta es la verdadera clave de su aprovechamiento en los edificios.

De forma general, el gradiente geotérmico observado en la mayor parte de la Tierra es de unos 2,5-3 °C cada 100 metros. Es decir, que a medida que se profundiza en el interior de la corteza, la temperatura se va incrementando a un ritmo de unos 25-30 °C cada 1000 metros. Es lo que se conoce como gradiente geotérmico normal.

EL gradiente geotérmico variará con:

- La conductividad térmica de las rocas. A mayor conductividad térmica de las rocas, mayor gradiente térmico
- El tipo de reacciones químicas que predominen en la zona. En el caso de predominar las reacciones endotérmicas, el gradiente será menor que en zonas donde predominen las reacciones exotérmicas
- La presencia y concentración de elementos radioactivos que desprendan calor al desintegrarse, elevando así el gradiente geotérmico
- La proximidad de rocas volcánicas aún no consolidadas, que aportan importantes fuentes de calor
- La existencia de aguas termales en la zona, etc.

3.2.2 Recurso geotérmico

Se estima que la potencia geotérmica total que nos llega desde el interior de la Tierra es de $4,2 \times 10^{12}$ J. Una cantidad de energía tan grande que sólo una fracción de ella puede ser utilizada por la humanidad. A este calor, que puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas, se denomina recurso geotérmico.

En el caso de temperaturas por debajo de los 100 °C, puede hacerse un aprovechamiento directo o través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración). Cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas, por debajo de los 25 °C, las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente.



3.2.3 Flujo de calor

El flujo de calor es la conductividad térmica (K) de los materiales. Se define como la capacidad de conducción de calor. Es característica de cada material, se mide $W/m \cdot ^\circ C$, e interviene en la ecuación de conducción:

$$Q = \frac{-K \cdot dT}{dZ} = K \cdot G$$

Siendo,

K: Coeficiente de conductividad térmica

G: Gradiente térmico

La conductividad térmica se mide en laboratorio sobre muestras de testigos de sondeos representativas de las formaciones geológicas atravesadas. Estimada a partir de tablas o mediante teste de respuesta térmica (TRT). Este último método es necesario en instalaciones medianas o grandes.

El valor de la conductividad térmica permite dimensionar los intercambiadores al facilitar la posibilidad de estimar la energía que se podrá extraer o inyectar mediante el intercambiador de calor enterrado.

3.2.4 Estimación de la temperatura del terreno

Tal y como se ha explicado anteriormente, a una determinada profundidad, el gradiente de temperatura del terreno es constante y no se ve afectado por las variaciones climáticas, como ocurre en las zonas más cercanas a la superficie. Este hecho se puede apreciar en la siguiente figura:

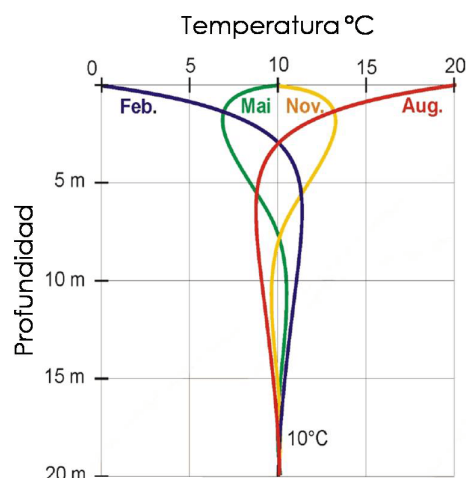


Figura 3: Variación de la temperatura en función de la profundidad



La temperatura del terreno en la zona más superficial (hasta 20 metros de profundidad) se puede calcular mediante el modelo propuesto por Hillel (1982). Con este modelo, se puede determinar la temperatura para un día concreto del año y para una determinada profundidad mediante la siguiente ecuación:

$$T(z, t) = T_0 - A_0 \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}} \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot \left(t - t_0 - \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}} \right) \right]$$

Siendo,

T: Temperatura a la profundidad z el día t (°C)

z: Profundidad (m)

t: Número de días desde el día de referencia

t₀: Constante de fase expresada en días

T₀: Temperatura media anual del terreno (°C)

A₀: Máxima diferencia de temperaturas anual en la superficie del terreno (K)

α: Difusividad térmica del terreno (m² /día). Se calcula de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

Siendo,

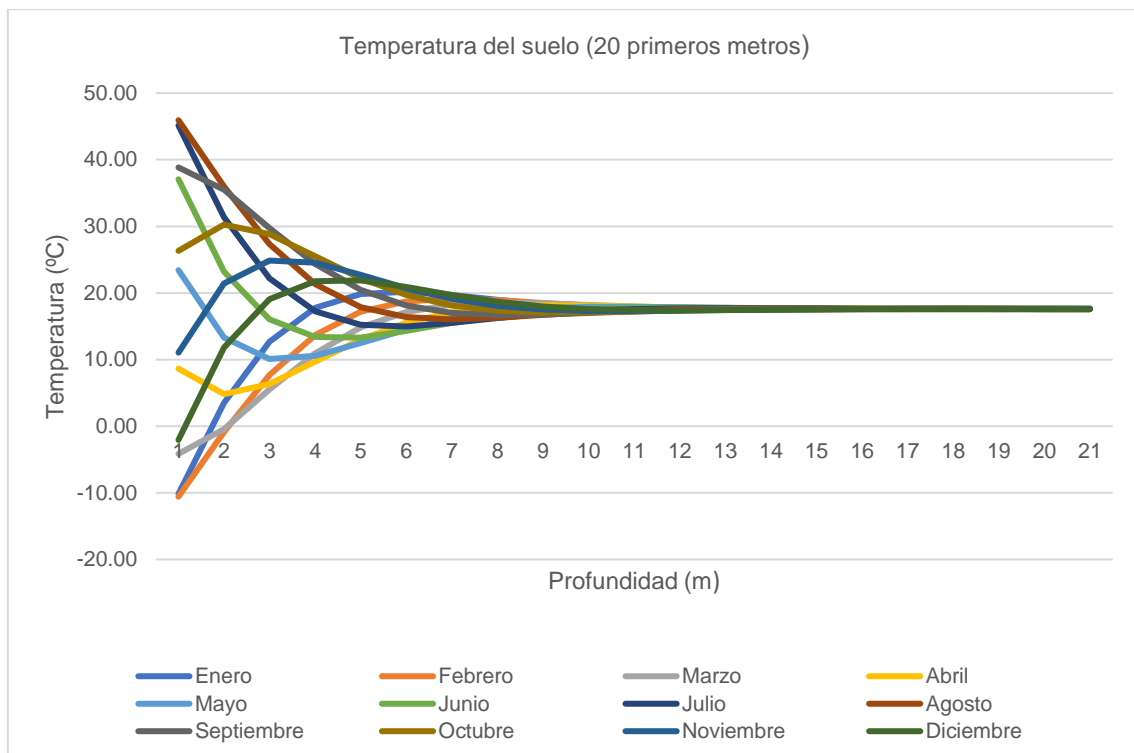
α: difusividad térmica (m²/s)

λ: Conductividad del material (W/m² · k)

ρ: Densidad del material (kg/m³)

C_p: Calor específico del material (J/kg ·k)

Para el municipio de Carlet, la temperatura en función de la profundidad, los 20 primeros metros, es constante a partir de los 14 metros y está alrededor de 17,50 °C:



3.3 Normativa

Esta forma de energía, desconocida en España hasta hace unos años, tanto en su implantación como en las normas, ha llegado al reconocimiento del concepto y su inclusión en las ayudas financieras, aunque todavía no en la norma regulatoria.

La geotermia tiene mucho en común con otras fuentes de energía renovable, pero con algunas diferencias. Por ejemplo, la geotermia superficial no produce electricidad, sino que la sustituye, ni debe tener que someterse al estudio de impacto ambiental. Pero, por el contrario, la geotermia tiene que enfrentarse con la legislación minera y tiene una situación oscura, y variable según la CCAA.

La geotermia, que no figuraba en ningún texto legal hace nada (salvo la ley de minas), ha ido ganando menciones muy rápidamente en la normativa en los últimos dos años. Es por eso, que debido a estas carencias se recurre a la norma VD 4640, vigente actualmente en Alemania:

- VDI 4640: Esta norma recoge básicamente el dimensionamiento de instalaciones geotérmicas con bomba de calor

Referente al diseño de la vivienda, el Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece y desarrolla las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones, permitiendo demostrar que se satisfacen los requisitos básicos de la edificación que establece la Ley.

El CTE está dividido en dos partes. En la primera se detallan las exigencias en materia de seguridad y de habitabilidad que son preceptivas a la hora de construir un edificio, según la Ley de Ordenación de la Edificación y la segunda se compone de los diferentes Documentos Básicos,



que son textos de carácter técnico que se encargan de trasladar al terreno práctico las exigencias detalladas en la primera parte del CTE.

En concreto, el Documento Básico de Ahorro de energía (DB-HE) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de ahorro de energía. El DB-HE está dividido en cinco capítulos, de los cuales el primero es el que es necesario conocer para realizar este trabajo.

Se trata de la limitación de la demanda energética (HE-1). Esta normativa tiene como objetivo garantizar que la demanda energética del edificio, obtenida a partir de las pérdidas y ganancias térmicas, sea igual o menos a unos valores de referencia establecidos.



4. INSTALACIÓN GEOTÉRMICA

A efectos del diseño el sistema geotérmico está formado por tres subsistemas principales:

- Intercambiador de calor subterráneo: Extrae o cede el calor al subsuelo de un edificio
- Bomba de calor: transfiere el calor entre el intercambiador de calor subterráneo y el sistema de distribución de un edificio
- Sistema de distribución: Transfiere el calor o el frío a las diferentes estancias del edificio

4.1 Sistemas de captación

El funcionamiento de los sistemas de captación geotérmica se basa en obtener la energía del subsuelo y transportarla mediante un fluido hasta unos intercambiadores de energía o colectores por los cuales circula el fluido, que normalmente es agua con anticongelante, que absorberá o cederá la energía del subsuelo en función de la diferencia de temperatura entre en el fluido y el terreno.

El objetivo fundamental es proporcionar un intercambio de calor a las bombas de calor geotérmicas, que suministran la climatización deseada a la vivienda.

4.1.1 Intercambiadores de calor

Los sistemas geotérmicos utilizados pueden clasificarse en dos categorías: sistemas abiertos o cerrados. Su utilización depende de si el terreno está saturado o no de agua y si es factible la utilización del agua subterránea.

Los circuitos abiertos precisan de un suministro adecuado en calidad y cantidad de agua: aguas subterráneas, embalses, río, etc. Y tienen la limitación importante de que para implantarlo es necesario que las regulaciones legales lo permitan. Se requiere un caudal comprendido entre 150 y 200 l/h por kW de potencia térmica, que ese caudal esté garantizado por un periodo de unos 25 años para poder amortizar las instalaciones y contar con la autorización del Organismo de Medio Ambiente competente, o Aguas correspondiente. Condiciones no siempre factibles.

En este tipo de circuito, la tubería colectora toma agua y la hace participar en el circuito intercambiador de calor de la bomba, a continuación, la devuelve al medio a cierta distancia, sin alteraciones mayores que cambios de temperatura. En proyectos de envergadura, no es irrelevante medioambientalmente. Para proyectos de media o alta potencia son, lógicamente, más económicos porque su inversión es notablemente inferior respecto a los sistemas cerrados.

Por el contrario, los sistemas cerrados son apropiados si no se dispone de un caudal suficiente de agua subterránea o la demanda térmica es suficientemente pequeña como para lograr eficazmente los intercambios requeridos.

El circuito cerrado permite la circulación del líquido intercambiador, que puede incluir un anticongelante cuando su temperatura baja a menos 4°C al salir del terreno y entrar en la



vivienda, siendo los más utilizados los de base alcohólica, como por ejemplo propilenglicol, mediante una bomba hidráulica. Se excluye cualquier contacto entre el fluido y el entorno.

La parte subterránea consta de unas tuberías enterradas en el subsuelo de pequeño diámetro, generalmente de polietileno. Se pueden diseñar disposiciones horizontales y verticales. La parte subterránea se conecta en superficie a las tuberías de polietileno de alta densidad cerrando el ciclo.

Adicionalmente, se precisa de un circuito de distribución en la propia vivienda que haga el intercambio en la misma.

- **Colectores horizontales**

Los intercambiadores geotérmicos horizontales se colocan en zanjas o en amplias excavaciones, a profundidades comprendidas entre 1,2 y 1,5 m en suelos con poca pendiente.

Son los más fáciles y más económicos de instalar, pero requieren una extensión de terreno comprendida entre 1,6 y 3 veces la superficie habitable a calentar, dependiendo de la calidad de los aislamientos de la vivienda.

Este espacio ocupado sólo se podrá dedicar a huerto o jardín sin arboles cuyas raíces podrían dañar los tubos de polietileno del intercambiador. No se puede impermeabilizar para que la radiación solar, el viento y el agua de lluvia que se infiltre en el suelo produzcan la regeneración térmica del mismo. Estas circunstancias hacen que su utilización se circunscriba, casi exclusivamente, al sector residencial en grandes parcelas.



Figura 4: Intercambiadores horizontales enterrados

- **Colectores verticales**

Consisten en dos tubos, generalmente de polietileno, unidos en sus extremos inferiores por una pieza en U del mismo material, o por cuatro tubos, unidos de dos en dos, por sendas piezas en U, constituyendo sondas geotérmicas simples o dobles, que se alojan en el interior de sondeos verticales, de alrededor de 150 mm de diámetro.



La profundidad de los sondeos suele oscilar entre 100 y 200 m, por lo que la influencia de la radiación solar y demás circunstancias meteorológicas superficiales sobre la temperatura del terreno, es insignificante comparada con el flujo de calor geotérmico.

Comparados con los intercambiadores horizontales, son más caros, pero a cambio ofrecen las siguientes ventajas:

- La superficie ocupada por los sondeos y los colectores horizontales que conectan las sondas con las bombas de calor situadas en los edificios es muy pequeñas y, además, puede impermeabilizarse o dedicarse a cualquier uso
- Los costes de mantenimiento son muy bajos y no se deterioran con el paso del tiempo. Un intercambiador geotérmico vertical bien construido tiene una vida útil de 50 años
- Proporcionan una potencia de extracción de calor específica de entre 30 y 70 W/m de sondeo, dependiendo de las características del terreno y de su conductividad térmica
- Por término medio, se precisa, aproximadamente, 1 m de sondeo por cada m² de superficie habitable a calentar
- La potencia de extracción de energía térmica del terreno puede llegar a ser muy elevada, pues las limitaciones existentes, relativas a la profundidad máxima que puede alcanzar un sondeo geotérmico sin que sea considerado una explotación minera sometida a concesión administrativa, se obvian perforando un conjunto de sondeos más cortos, convenientemente espaciados, constituyendo lo que se denomina un campo de sondas geotérmicas
- No presentan las servidumbres de los intercambiadores horizontales, pudiendo instalarse debajo de las edificaciones a las que prestan servicio

Las únicas limitaciones que atañen a las sondas geotérmicas son las relacionadas con las distancias mínimas de separación con otros elementos constructivos y objetos, pudiendo citar:

- De cimentaciones, pozos, fosas sépticas y saneamiento: 2 o 3 m, según países
- De conducciones enterradas no hidráulicas: 0,7 o 1,5 m, según países
- De árboles y límites de parcela: 5 m
- Entre sondeos geotérmicos: como referencia 6 m en Alemania o 10 m en Francia, para sondeos de hasta 100 m de profundidad



Figura 5: Intercambiadores verticales enterrados



4.1.2 Fluido caloportador

El fluido caloportador es una solución de un producto anticongelante que circula por dentro de las tuberías que conforman el intercambiador geotérmico y que transporta el calor desde el terreno hasta la bomba de calor o viceversa. Para ello, debe cumplir con una serie de requisitos como son el punto de congelación, buenas propiedades termodinámicas, viscosidad, etc.

Las propiedades de los fluidos más utilizados son:

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	1	0,9259	0,8630
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12
Punto ebullición °C	100	197	187
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,79	57,4	243
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,01	20,9	60,5
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	0,655	9,5	18,0
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 ⁻³	0,60	0,26	0,20

Figura 6: Propiedades físicas de los fluidos

4.1.3 Sondeos geotérmicos

El diámetro de un sondeo geotérmico depende del diámetro de los tubos de la sonda y de su número, dos o cuatro. Normalmente, está comprendido entre 150 y 180 mm. No debe ser muy grande, pues la sonda podría retorcerse durante su introducción en el pozo, ni muy pequeño, pues quedaría poco espacio anular entre los tubos y las paredes del sondeo para poder efectuar un relleno con material granular o una cementación correctos.

Las profundidades que pueden alcanzar están condicionadas por las capacidades de los equipos de perforación que se utilicen y por las disposiciones en materia de legislación minera y de protección de aguas subterráneas. En España, suelen estar comprendidas entre 100 y 200 m.

Los equipos de perforación que se utilizan suelen ser de pequeñas dimensiones, montados sobre orugas con zapatas de goma, y con un ancho no mayor de 2 m para que puedan entrar en parcelas de viviendas ya construidas con accesos estrechos, y facilitar su descenso en excavaciones suspendidos del brazo de una grúa.

También existen equipos más compactos, montados sobre orugas de goma, con 0,8 m de anchura, que permiten realizar perforaciones desde garajes y sótanos.



Figura 7: Descenso de una perforadora a una excavación

En los últimos años, se han desarrollado equipos de perforación específicos para la instalación de sondas geotérmicas, que proporcionan elevados rendimientos en cualquier tipo de terreno y permiten abaratar el coste de perforación.

Se trata de equipos con doble unidad de rotación. La unidad superior arrastra el varillaje interior con el martillo de fondo, o con una herramienta de corte, mientras que la unidad inferior arrastra la tubería de revestimiento del sondeo de forma simultánea. Las dos unidades giran en sentido contrario, lo cual facilita la extracción de los detritos y elimina el riesgo de pérdida de la sarta inferior.

Van dotadas de triple mordaza, para facilitar la manipulación y extracción de la tubería de revestimiento y de un sistema de evacuación de detritos.



Figura 8: Perforadora con doble unidad de rotación y manguera para descarga de detritos en un contenedor



Los detritos de perforación, a medida que se producen, y los lodos de sondeos, si llegan a emplearse, se recogen en contenedores adecuados, y son trasladados a lugares de vertidos apropiados.

4.1.4 Sondas geotérmicas

El material más usado para los tubos de las sondas geotérmicas es el polietileno de alta densidad por ser uno de los plásticos más comunes y más baratos. No es tóxico, es impermeable y flexible, y ofrece buena resistencia térmica, química y al impacto.

En la recepción en obra de las sondas se comprueba el marcado, la documentación técnica que las acompaña, se revisa que no presenten rasguños o fisuras ocasionados durante el transporte y manipulación, y se someten a una prueba de estanqueidad, con aire o con agua, y a una prueba de caudal para comprobar que no hay ninguna resistencia extraña en su interior.

Se rellenan con agua, o con agua y anticongelante, antes de su introducción en el sondeo, para evitar que los tubos puedan aplastarse por diferencias de presión entre el interior y exterior de los tubos en caso de existir agua o lodos de sondeo, o cuando se realice la cementación.

Para facilitar el descenso en el sondeo se cuelga un lastre en el pide de sonda que quedará perdido en el fondo.



Figura 9: Colocación de sondas geotérmicas

La sonda geotérmica y el tubo de polietileno de 25 mm de diámetro que se suele emplear para cementar el sondeo se deben bajar con sumo cuidado, colocando regularmente espaciadores, centradores y abrazaderas de plástico, para que los tubos queden los más verticalmente posible y separados unos de otros.

4.1.5 Relleno del sondeo

El espacio que queda entre las tuberías del intercambiador y las paredes del hueco del sondeo se rellena con arena silíceica calibrada o se cementa con una suspensión de cemento, bentonita y arena silíceica al objeto de lograr un buen contacto térmico entre los tubos de la sonda y el terreno, cerrar el sondeo desde la superficie para evitar la entrada de contaminantes exteriores, y sellar los acuíferos que hayan podido ser atravesados durante la perforación.



La elección de un material de relleno o cementación dependerá de las medidas que sea preciso tomar para preservar la calidad de las aguas subterráneas, no alterar su flujo y evitar la intrusión de unos acuíferos en otros, si es que se han cortada varios.

La opción más empleada es la cementación, pues es la mejor forma de asegurar una unión física y químicamente estable, impermeable y duradera de la sonda geotérmica al terreno. La cementación se realiza inyectando el mortero a presión desde la parte más baja del sondeo, para que se rellene el espacio anular en sentido ascendente, evitando que queden huecos de aire que disminuirían la transmisión de calor.

Una vez cementado el sondeo, se somete a la sonda a un ensayo de presión definitivo para comprobar que no existen fugas, y poder garantizar que, en condiciones normales de trabajo, la sonda tenga una vida útil de 50 años.



Figura 10: Cementación del sondeo geotérmico

4.1.6 Aprovechamiento energético de las infraestructuras y obras subterráneas

En zonas urbanas, el espacio subterráneo abarca las infraestructuras de los diversos sistemas funcionales: almacenamiento (agua, aceites, etc.), industriales (plantas de energía), transporte (ferrocarriles, metro, etc.), redes de servicio y abastecimiento (agua, alcantarillado, gas, etc.), espacios públicos (centros comerciales, hospitales, etc.) y privados (garajes). Es decir, el espacio urbano subterráneo se utiliza con intensidad. La interacción termodinámica entre los tres elementos que entran en juego en este contexto, el terreno, el aire y el agua, es una fuente inagotable de posibilidades para el intercambio, la extracción, la inyección, el almacenamiento y el uso de la energía.

Para el aprovechamiento del potencial geotérmico de todos estos sistemas enterrados hay numerosos procedimientos.

Como la mayoría de ellos son infraestructuras subterráneas construidas en obra de fábrica u hormigón de elevada conductividad térmica, su termoactivación como intercambiador,



incorporando circuitos de transferencia de energía que llevan en su interior un fluido caloportador es la forma más usada.

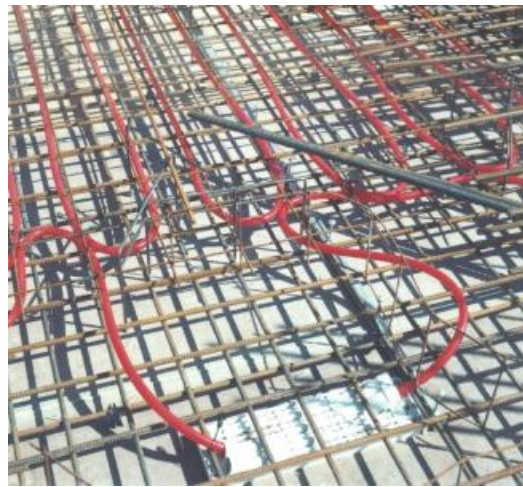


Figura 11: Forjado termoactivo con un núcleo de hormigón atemperado

También existen otros medios de realizar la transferencia energética, como el aprovechamiento de la energía de las aguas de infiltración de túneles, el intercambio abierto con capas freáticas presentes, o el intercambio tierra-aire en instalaciones para pretratar el aire de renovación de los edificios.



Figura 12: Aprovechamiento de la energía de la red de saneamiento urbano para la climatización de edificios

4.2 Bomba de calor

Una bomba de calor es un sistema termodinámico cerrado donde se produce un intercambio de energía, concretamente de calor, entre diferentes medios. Este proceso se lleva a cabo mediante un componente químico que incorpora en su interior denominado refrigerante, que a partir de alterar su presión y temperatura permite retirar o ceder calor al fluido climatizador. Por tanto, las bombas de calor se utilizan en equipos de climatización, ya sea para aportar calor a los sistemas,

como podría ser Agua Caliente Sanitaria, calefacción, etc., o también para aportar frío invirtiendo el ciclo termodinámico.

El fluido refrigerante cambia de estado (líquido o gaseoso) en función de los cuatro órganos que atraviesa: evaporador, compresor, condensador y descompresor.

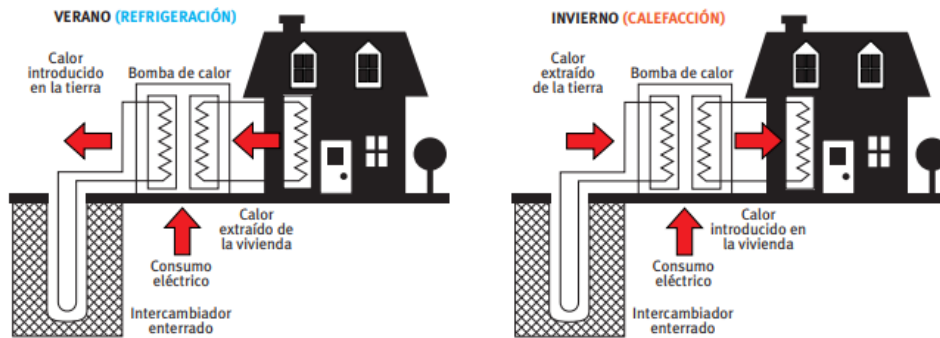


Figura 13: Funcionamiento bomba de calor

En el evaporador, el calor captado en el terreno por un fluido portador de calor, que recorre el intercambiador subterráneo, es transferido al fluido frigorífico, que se vaporiza pasando del estado líquido al estado gaseoso.

El compresor eléctrico comprime el gas frigorífico y eleva su temperatura.

El condensador permite al gas frigorífico ceder calor al fluido del circuito de calefacción de un edificio, volviendo al estado líquido.

EL descompresor rebaja la presión del líquido frigorífico, que comienza su vaporización iniciando un nuevo ciclo.

El fluido caloportador, una vez enfriado en el evaporador, retorna al subsuelo.

En modo refrigeración, mediante una válvula de expansión de doble sentido y una válvula de cuatro vías a la salida del compresor, se invierte el sentido de funcionamiento del sistema, y el calor excedente de la vivienda es evacuado al subsuelo fresco.

El rendimiento de una bomba de calor geotérmica en modo calefacción se mide por la relación entre la cantidad de calor producida y la energía eléctrica consumida. Esta relación se denomina COP (Coeficiente Of Performance) y suele estar comprendida entre 3 y 6.

$$\text{COP} = \frac{\text{Potencia calorífica aportada (kW)}}{\text{Potencia calorífica absorbida (kW)}}$$

Una termobomba que tenga un COP de 5 significa que proporciona 5 kW de energía térmica al edificio por cada kW de energía eléctrica consumida por el motor del compresor, las bombas de circulación de los fluidos, el termostato, etc. Es decir, que 4 kW son de energía geotérmica, que es gratuita.



En el caso de la utilización de la bomba de calor para refrigeración, el COP es sustituido por un valor denominado EER (Efficiency Energy Ratio), que indica la eficiencia de refrigeración que presenta la bomba, y corresponde a la relación entre la potencia frigorífica total y la potencia útil absorbida por la bomba de calor.

$$EER = \frac{\text{Potencia frigorífica aportada (kW)}}{\text{Potencia frigorífica absorbida (kW)}}$$

La gran ventaja de las bombas de calor radica en su eficiencia en calefacción, ya que son sistemas capaces de aportar más energía que la que consumen, aproximadamente entre 2 y 3 veces más.

Esto es debido a que dichos equipos recuperan la energía del ambiente exterior y la incorporan como energía útil para la calefacción. Así pues, consumen menos energía que otros sistemas de calefacción para conseguir el mismo efecto.

La bomba de calor que debe ser instalada en la vivienda es aquella que cubra las necesidades requeridas tanto para calefacción como para refrigeración en las condiciones climatológicas más adversas.

4.3 Sistemas de distribución

Existen diversas formas de transferir el calor almacenado en el depósito de agua al ambiente de la vivienda: suelo radiante, radiadores de baja temperatura, fan-coils y radiadores convencionales.

4.3.1 Suelo radiante

El agua caliente circula por toda la superficie de la estancia a calefactar, cediendo su calor al ambiente.

Se caracteriza por:

- La temperatura de trabajo es inferior a otros sistemas (35 °C)
- Posee una menor temperatura ambiente para una sensación de confort similar, homogeneidad
- Tiene posibilidad de refrigeración
- Tiene ausencia de corrientes de aire
- Es estéticamente invisible, sin elementos visibles en la estancia
- Su instalación es solamente rentable para obra nueva porque implica una gran mano de obra
- Tiene gran complejidad en la reparación de fugas
- La bomba a emplear es de tipo agua-agua

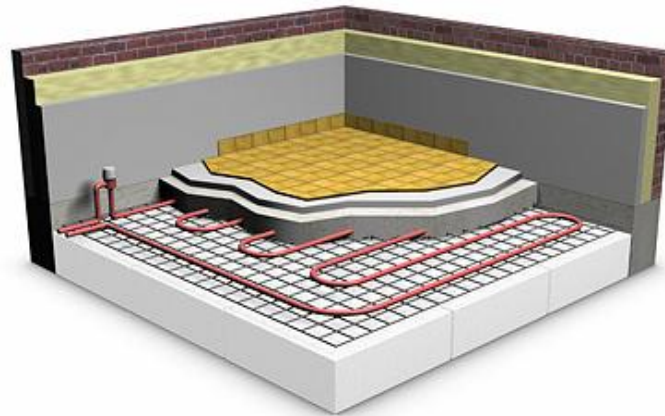


Figura 14: Detalle suelo radiante

4.3.2 Radiadores de baja temperatura

Son radiadores con un aspecto similar a los tradicionales, pero con la diferencia que están diseñados para trabajar con temperaturas de trabajo de entre 35 y 45 °C. La transmisión de calor se realiza casi al 100% por convección.

Se caracterizan por:

- Pueden trabajar con bombas geotérmicas
- Tienen una baja inercia térmica
- Poseen una amplia gama de configuraciones
- Tienen un alto coste (puede triplicar el de uno convencional)
- Son de mayor tamaño

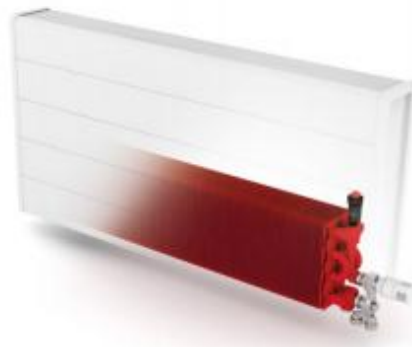


Figura 15: Radiador de baja temperatura

4.3.3 Fan-coils

Son dispositivos formados por una batería de intercambio por donde circula agua caliente o frío y un ventilador para el forzado del paso de aire por la batería. Para evitar la aspiración de suciedad montan un filtro de aire a la entrada.



Se caracterizan por:

- Tienen un sistema de calentamiento-enfriamiento muy rápido
- Permiten calor y frío
- Son capaces de climatizar grandes volúmenes
- Generan turbulencias por el aire en movimiento
- Necesitan alimentación eléctrica
- Tienen un mayor nivel de ruido



Figura 16: Fan-coil

4.3.4 Radiadores convencionales

Son los elementos más habituales, generalmente fabricados en aluminio, aunque también es posible encontrarlos en fundición o chapa de acero.

Se caracterizan por:

- Ser la opción más económica
- Ya están instalados en la mayoría de viviendas
- Son estéticamente muy visibles
- Generan una mala homogeneidad de temperatura en la estancia
- Necesitan una alta temperatura de trabajo 80 grados centígrados
- No tiene posibilidad de refrigeración



Figura 17: Radiador convencional



5. CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO

5.1 Ubicación de la vivienda y relieve

La vivienda se sitúa en la Urbanización “Ausias March II”, ciudad jardín en suelo urbano residencial, con tipología de vivienda unifamiliar aislada, situado en la parte noreste del término municipal de Carlet en la Comunidad Valenciana. Las coordenadas geográficas del municipio son:

Latitud	39.251
Longitud	0.495
Altitud	48

Tabla 1: Coordenadas geográficas del municipio de Carlet

La ubicación del municipio en la cuenca hidrográfica del Júcar, y junto al río Magro ha condicionado significativamente la orografía del terreno. Gracias a las aguas de ambos ríos, en la actualidad más del 90% de la superficie cultivable es de regadío, lo cual genera una gran actividad agrícola, básica para el desarrollo económico local. La propia ciudad de Carlet ha crecido en el margen derecho del río Magro como núcleo residencial y en el margen izquierdo como núcleo industrial, siendo su cauce una barrera física natural que condiciona su crecimiento. El término municipal de Carlet está ubicado básicamente en una zona interior llana, limítrofe con comarcas costeras y de montaña.

El mismo río Magro divide el amplio término en dos mitades prácticamente iguales. La parte de la izquierda, es decir, hacia el este, forma una gran llanura (El Pla), que llega al límite con Alginet por el noreste, del cual lo separan las colinas del Cabezol (89 m). La parte de la derecha, donde está también la capital municipal, se extiende hacia el suroeste hasta tocar las estribaciones de la Sierra de Matamón en los alrededores de la Casa Blanca como se indica en la Hoja 746 del Mapa Geográfico Nacional a escala 1:50.000 (1), es decir, en las laderas surorientales de las Lomas de Matamón, donde sólo en algunos puntos se consiguen superar los 250 m de altura.

5.2 Geología

Según el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la hoja correspondiente a la ubicación de la vivienda, en el municipio de Carlet, es la hoja 747 “Sueca”. Según esta hoja, la zona donde van a situarse las sondas geotérmicas está compuesta por calizas pulverulentas, baldosas y hojosas, tal y como está explicado en el “Anejo nº 01: Características geológicas y climáticas de Carlet”.



6. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

La vivienda, objeto de este trabajo, consiste en un edificio que se organiza en una sola planta. La ocupación en planta es de 190,02 m², retranqueándose 5 metros de la alineación vial de la urbanización y 3 metros de la parcela colindante situada al sur. En el “*Documento nº 02: Planos*” queda definida la planta y alzados del edificio.

La superficie útil de las estancias se muestra en la siguiente tabla:

Estancia	Superficie (m ²)
Aseo	3.15
Lavadero	6.45
Cocina	7.07
Salón-comedor	35.34
Habitación 1	9.60
Habitación 2	10.00
Habitación 3	12.98
Baño	4.54
Pasillo	6.25
Total	95.38

Tabla 2: Superficie útil de las estancias de la vivienda

No se han tenido en cuenta los espacios exteriores, como la barbacoa y la terraza, ni tampoco el garaje, porque a efectos del cálculo de la demanda energética de la vivienda no tienen ninguna repercusión.



7. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA VIVIENDA

7.1 Orientación

La vivienda está orientada hacia el noroeste, tal cual está orientada la parcela, estando las cuatro fachadas libres. Debido a que la vivienda ocupa casi todo el ancho de la parcela, los alzados laterales quedan protegidos parcialmente por las viviendas colindantes.

La siguiente tabla, extraída del CTE, muestra cuales son los ángulos que más afectan a cada orientación. Es importante considerar dichos ángulos, ya que en función de la orientación de la vivienda las pérdidas variarán.

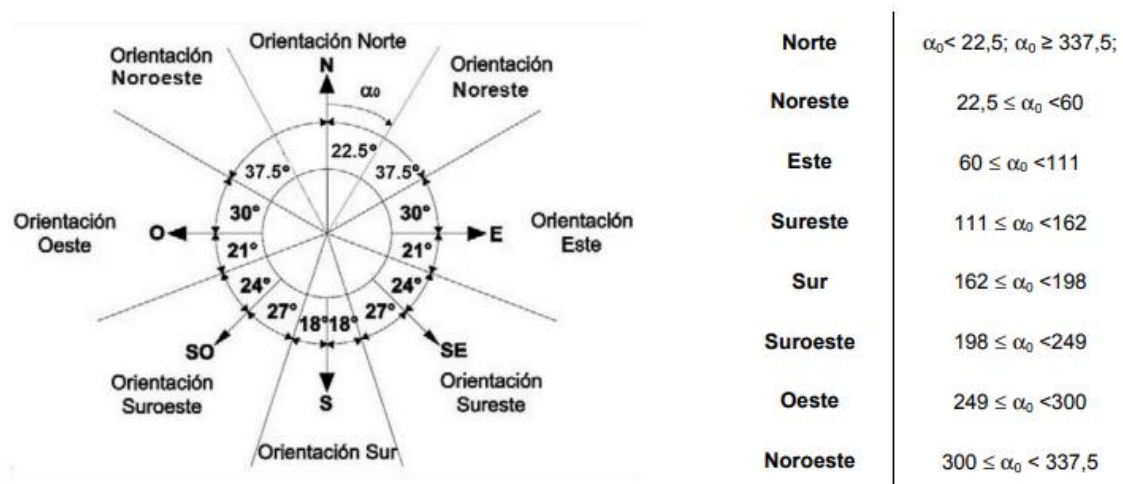


Figura 18: Orientaciones según el CTE

La inclinación de la luz solar es diferente a lo largo del año. En épocas estivales, esta trayectoria realiza un trazado más vertical en comparación con las épocas invernales, que realiza una trayectoria más horizontal.

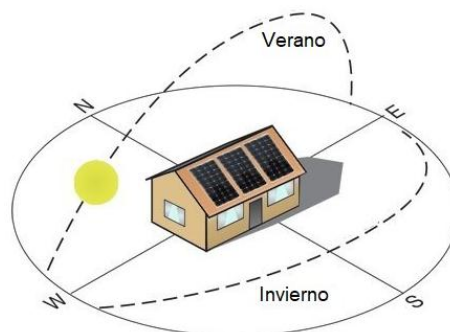


Figura 19: Trayectoria solar en invierno y verano

Tal y como se aprecia en la anterior imagen, en épocas estivales, las fachadas más influenciadas por la radiación solar son las fachadas este y oeste, y en menor medida la fachada sur. En cambio, en invierno, la fachada que recibe mayor radiación solar es la fachada sur. La fachada norte queda a la sombra durante todas las estaciones del año.



7.2 Zona climática

Para poder determinar la demanda energética de la vivienda que permita conocer los requisitos básicos para una buena climatización, es necesario obtener las condiciones climáticas de la zona de estudio. De esta manera, se conseguirá reducir el sobredimensionado de las máquinas de calefacción y/o refrigeración.

La zona climática se determina mediante el DB-HE del CTE. Se trata de la limitación de la demanda energética (HE-1). Esta normativa tiene como objetivo garantizar que la demanda energética del edificio, obtenida a partir de las pérdidas y ganancias térmicas, sea igual o menos a unos valores de referencia establecidos.

Para cualquier edificio, se establece una zona climática definida por una letra (A a la E) y un número (1 al 4). La letra hace referencia a la severidad climática de invierno y el número a la severidad climática de verano. Cada capital de comarca de España tiene una zona asignada, y para la resta de localidades se puede determinar la zona a partir de la latitud sobre su capital de provincia.

Tal y como se indica en el “Anejo nº 01: Características geológicas y climáticas de Carlet”, al municipio de Carlet le corresponde la zona climática **B3**.

7.3 Cerramientos exteriores

Para determinar el cálculo de la demanda energética, se ha de tener en cuenta las pérdidas por transmisión de calor a través de los cerramientos, techo y superficies en contacto con el suelo.

Los cerramientos tienen las siguientes superficies:

Estancia	Muro	Longitud (m)	Altura (m)	Superficie (m ²)
Aseo	Norte	1.80	2.70	4.86
Lavadero	Norte	2.10	2.70	5.67
Cocina	Este	2.02	2.70	5.45
Salón-comedor	Este	6.93	2.70	18.71
	Oeste	6.93	2.70	18.71
Habitación 1	Este	2.40	2.70	6.48
Habitación 2	Este	2.50	2.70	6.75
Habitación 3	Este	3.77	2.70	10.18
	Sur	3.20	2.70	8.64
Baño	Sur	1.80	2.70	4.86
	Oeste	2.52	2.70	6.80
Pasillo	Oeste	6.25	2.70	16.88

Tabla 3: Superficie de los cerramientos exteriores

Los cerramientos exteriores están formados por:

- Hoja de ladrillo CARA-VISTA de 25x11,5x4
- Enfoscado con mortero de cemento hidrófugo



- Aislante térmico de LANA DE ROCA
- Tabique de ladrillos huecos de 7 cm
- Enlucido de yeso aislante

En función de la orientación, el coeficiente global de transferencia de calor "U" de los cerramientos es:

Orientación cerramiento	U ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)
Norte	0.42
Este	0.52
Sur	0.52
Oeste	0.50

Tabla 4: Transmitancia térmica "U" de los cerramientos exteriores

7.4 Particiones interiores

Todas las particiones interiores verticales limitan entre sí con zonas habitables que están a la misma temperatura, por lo que su cálculo no influye en las cargas térmicas de la vivienda.

7.5 Suelo

Sobre un soporte resistente o forjado se dispone la capa de aislante y una capa de mortero como soporte del acabado (suelo laminado, etc.) que será la capa más superficial.

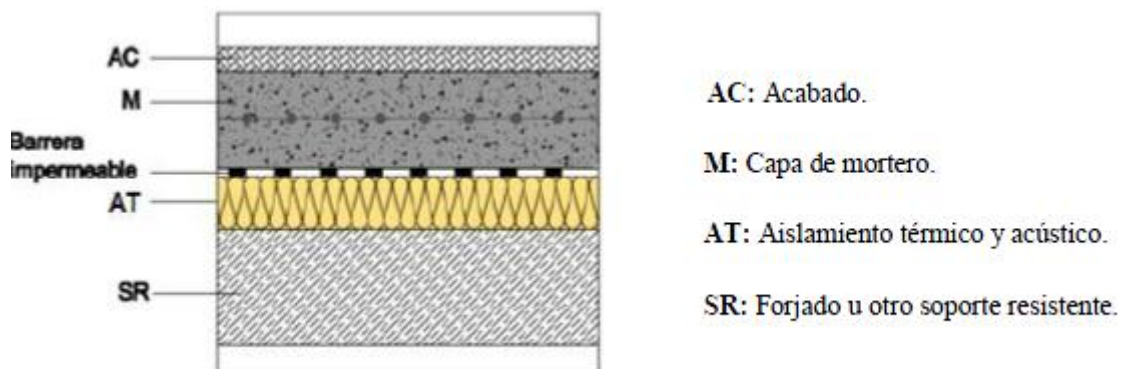


Figura 20: Detalle constructivo del suelo

El coeficiente global de transmitancia térmica "U" para el suelo es:

Material	Espesor (m)	Conductividad "λ" (W/m K)
Baldosa cerámica	0.012	0.81
Mortero	0.03	1.3
Lana mineral	0.04	0.04
Forjado	0.3	0.256
$U = 0.42 \frac{W}{m^2 \cdot K}$		

Tabla 5: Transmitancia térmica "U" del suelo



7.6 Huecos

Se ha de tener en cuenta, también, las pérdidas por transmisión de calor a través de los cristales, marcos y puertas. Tanto los marcos como las puertas son de color gris, aspecto a tener en cuenta en la absorptividad del marco.

7.6.1 Ventanas

Las ventanas son elementos arquitectónicos cuya finalidad es proporcionar luz y ventilar la estancia correspondiente. Además, protegen del frío y del calor, aíslan del ruido exterior y sirven como elemento decorativo.

En este caso, el acristalamiento está formado por: 4 mm interior más una cámara de 12 mm y un vidrio laminar 3+3 mm al exterior. El marco es metálico sin rotura de puente térmico y de color gris medio. Cabe destacar que, todas las ventanas incluyen lamas por lo que la entrada de radiación solar disminuye.

La estimación del coeficiente global de transferencia de calor "U" es:

$$U = 3,30 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.6.2 Puerta exterior

La vivienda dispone de una única puerta de acceso a la vivienda, ubicada en el cerramiento oeste. La puerta es de aluminio de color gris medio, es decir, a efectos de cálculo el marco es metálico sin rotura de puente térmico por lo que la estimación del coeficiente global de transferencia de calor "U" es:

$$U = 5,70 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.7 Cubierta

La cubierta es de teja plana sobre forjado inclinado. Así pues, el coeficiente global de transferencia de calor "U" es:

$$U = 0,43 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

7.8 Puentes térmicos

Se consideran puente térmicos las zonas de la envolvente del edificio en las que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción, ya sea por un cambio del espesor del cerramiento, de los materiales empleados, por penetración de elementos constructivos con diferente conductividad, etc., lo que conlleva necesariamente una minoración de la resistencia térmica respecto de resto de los cerramientos. Es decir, son zonas donde se transmite más fácilmente el calor, bien por las características del material o por su espesor.



Los puentes térmicos son partes sensibles de los edificios donde aumenta la posibilidad de producción de condensaciones superficiales, en la situación de invierno o época frías. Un puente térmico, supone un flujo de calor entre el interior y el exterior (y viceversa) que conlleva sus respectivas pérdidas de energía. La mejora de aislamientos en puentes térmicos implica altos porcentajes de ahorro. Lo ideal es que la capa de aislamiento sea continua y de espesor constante.

Para calcular el flujo de calor a través de los puentes térmicos hay que tener en cuenta detalles arquitectónicos, como la definición detallada de forjados y voladizos, número de pilares, etc. Puesto que algunos de estos detalles se desconocen parcialmente y estos conceptos superan el alcance de este proyecto, el cálculo de las pérdidas energéticas a través de puentes térmicos se despreciará.



8. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA

Para la climatización de la vivienda se ha elegido, como instalación de suministro de energía, una instalación de energía geotérmica de baja temperatura, de sistema cerrado con sondas geotérmicas verticales en doble U (que conforman el intercambiador geotérmico) alojadas en sondeos verticales que no superen los 150-200 metros de profundidad.

Las sondas geotérmicas llevan asociadas una bomba de calor geotérmica, la cual deberá ser reversible para abastecer tanto las necesidades de calefacción como de refrigeración.

Como sistema de distribución que encauce el calor o el frío a las diferentes estancias del edificio se ha elegido una instalación de suelo radiante, por ser la más efectiva.

A la hora del dimensionamiento de la instalación geotérmica, los pasos que hay que seguir son los siguientes:





9. CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DE LA VIVIENDA

Las pérdidas y ganancias térmicas son solicitaciones que alteran las condiciones térmicas de la vivienda, afectando directamente al espacio interior (ganancias), o transmitidas por conducción a través de la envolvente (pérdidas). Las condiciones de confort óptimas que hay que mantener en el interior de las estancias son:

Estación	Temperatura operativa (°C)	Humedad relativa (%)
Invierno	21-23	45-60
Verano	23-25	40-50

Tabla 6: Condiciones interiores de la vivienda

Las pérdidas y ganancias vienen determinadas por la radiación solar, las condiciones climatológicas del lugar donde se ubica el edificio, las características constructivas del mismo, su uso y la ocupación de las personas.

Esto supone un problema muy complejo dependiente de fenómenos como la geometría y radiación solar, las condiciones climatológicas, las características constructivas del edificio y la influencia de la actividad. Algunos de estos fenómenos son difíciles de cuantificar o son muy variables, por lo que el estudio de cargas térmicas tendrá que estar basado en gran parte en consideraciones e hipótesis.

Por otra parte, en los cálculos recogidos a continuación, no se ha tenido en cuenta el estudio de cargas latentes y sensibles, ya que frente a las pérdidas o ganancias por conducción y por radiación solar se consideran despreciables.

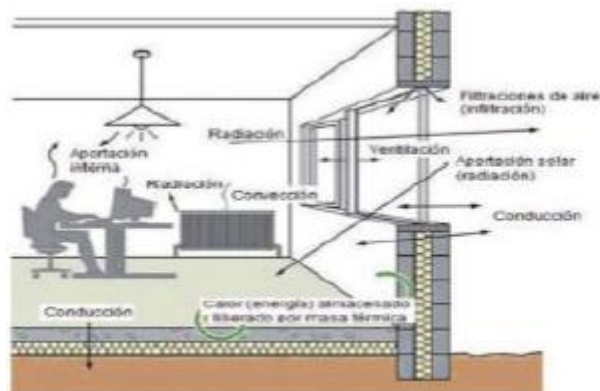


Figura 21: Pérdidas y ganancias en un local

El objetivo último del cálculo de la demanda térmica de la vivienda es el de saber cuál será la demanda térmica máxima tanto para calefacción como para refrigeración, y así ser capaces de elegir una bomba de calor que pueda abastecerla.

A la hora de realizar los cálculos, se tomarán los valores más conservadores, es decir, los que peor afecten climáticamente a la vivienda en función de la época del año (invierno o verano). Por ello, las cargas de invierno dependerán únicamente de las condiciones climatológicas exteriores. Ciertos fenómenos, como los de soleamiento y ocupación, no se tendrán en cuenta porque mejoran las condiciones y, como se ha mencionado, se quiere ser conservador y es preferible



sobredimensionar la instalación a no se capaz de cumplir con la demanda. Sin embargo, en verano sí se tendrán en cuenta los fenómenos de aporte de carga térmica, ya que son desfavorables.

9.1 Cálculo de la demanda máxima de calefacción

Durante los meses de invierno, se demanda calefacción para mantener las estancias en las condiciones de confort deseadas. Para el estudio de dicha demanda, se han tenido en cuenta la carga térmica por transmisión y la carga térmica por ventilación e infiltraciones. Se ha analizado individualmente la demanda de cada una de las estancias de manera que la demanda total será la suma de todas ellas.

9.1.1 Carga térmica por transmisión

El calor se transmite a través de los cerramientos (muros y acristalamientos) hacia los locales no climatizados o hacia el exterior. La carga térmica por transmisión se calcula de la siguiente manera:

$$Q_t = C_o \cdot C_i \cdot U \cdot S \cdot \Delta T$$

Siendo,

Q_t : Carga térmica por transmisión (W)

C_o : Coeficiente de orientación del cerramiento

C_i : Coeficiente de intermitencia de la instalación

U : Coeficiente global de transmisión de calor del cerramiento ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

S : Superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas (m^2)

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior ($^{\circ}C$)

El coeficiente de orientación es un factor adimensional empleado para tener en cuenta la ausencia de radiación solar y la presencia de vientos dominantes sobre los muros, en función de su orientación. En los muros de separación con otros locales o en los cerramientos no verticales no se tiene en cuenta. Habitualmente se emplean los siguientes valores para los coeficientes de orientación:

Orientación	Coeficiente
Norte	1,15
Sur	1,00
Este	1,10
Oeste	1,05

Tabla 7: Coeficientes de orientación



El coeficiente de intermitencia es un coeficiente de seguridad. Debe su nombre a que en las antiguas instalaciones colectivas sin contabilización de consumo, el generador arrancaba únicamente en horario predefinido. Habitualmente se emplea 1,10 como coeficiente de intermitencia o seguridad.

9.1.2 Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior

Una mala estanqueidad de la vivienda provoca infiltraciones de aire no deseadas y la ventilación y renovación del aire también supone un aumento de la carga térmica. Ésta se determina de la siguiente manera:

$$Q_v = V \cdot N \cdot 0,34 \cdot \Delta T$$

Siendo,

Q_v : Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior (W)

V: Volumen del local a calefactar (m^3)

N: Número de renovaciones horarias (h^{-1}). En este caso, se considerará 1 renovación/hora para todas las estancias

0,34: Calor específico del aire en base al volumen ($\frac{W \cdot h}{m^3 \cdot K}$)

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior ($^{\circ}C$)

9.1.3 Pérdidas de calor totales

La demanda total de calor (Q_c) es la suma de la carga térmica por transmisión (Q_t) y la carga térmica por ventilación o infiltración del aire exterior (Q_v):

$$Q_c = Q_t + Q_v$$

Según esto, la demanda total de calefacción obtenida para las peores condiciones posibles es de 7,724 kW. El cálculo de la demanda máxima de calefacción para todas las estancias se puede consultar en el "Anejo nº 02: Cálculo de la demanda energética".

9.2 Cálculo de la demanda máxima de refrigeración

El verano es la época del año en la que hay una demanda de frío, por ello habrá que calcular las cargas térmicas para refrigeración de las estancias. El estudio de dicha demanda se lleva a cabo de una manera similar al de la demanda de calefacción, teniendo en cuenta la carga térmica por transmisión en cerramientos y huecos, la carga por ventilación e infiltraciones y, además, la carga térmica por radiación solar. De nuevo, se ha analizado individualmente la demanda de cada una de las estancias, siendo la demanda total la suma de todas ellas.



Otras cargas térmicas como la ocupación de las estancias o las pérdidas de los aparatos eléctricos se han despreciado al considerarse insignificantes con respecto a las otras cargas térmicas estudiadas.

9.2.1 Carga térmica por transmisión

Las cargas térmicas por transmisión a través de los muros y huecos se calculan siguiendo el mismo modelo que en el caso anterior:

$$Q_t = C_o \cdot C_i \cdot U \cdot S \cdot \Delta T$$

Siendo,

Q_t : Carga térmica por transmisión (W)

C_o : Coeficiente de orientación del cerramiento. Los valores que se toman para verano son:

Orientación	Coeficiente
Norte	1,00
Sur	1,15
Este	1,05
Oeste	1,10

Tabla 8: Coeficientes de orientación

C_i : Coeficiente de intermitencia de la instalación

U : Coeficiente global de transmisión de calor del cerramiento ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

S : Superficie del muro expuesta a la diferencia de temperaturas (m^2)

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior ($^{\circ}C$)

9.2.2 Cargas térmicas por radiación solar

La radiación solar atravesará las superficies traslúcidas y transparentes, de manera que incide sobre las superficies del interior de las estancias, calentándolas e incrementando la temperatura del ambiente interior. No obstante, no se tendrá en cuenta en huecos con orientación norte ya que no reciben radiación directa. Se calcula según el siguiente modelo:

$$Q_s = S \cdot R \cdot F$$

Siendo,

Q_s : Carga térmica por radiación solar (W)

S : Superficie traslúcida o transparente expuesta a la radiación (m^2)



R: Radiación solar que incide en la superficie S ($\frac{W}{m^2}$). Para su cálculo se parte de la irradiancia global media y de las horas de luz al día, de manera que:

$$5000 \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \cdot \frac{día}{15h} = 333,33 \frac{W}{m^2}$$

F: Factor de corrección. Depende del tipo de vidrio, del efecto de sombras, etc. Se tomará un valor de 0,3, bastante reducido, ya que se han considerado las lamas en las ventanas y tipo de vidrio doble, por lo que la cantidad de radiación solar que atravesará los huecos no será desmesurada en ningún caso.

9.2.3 Carga sensible por ventilación o infiltración de aire exterior

De manera análoga al cálculo de esta carga térmica en calefacción, se calcula siguiendo el siguiente modelo:

$$Q_v = V \cdot N \cdot 0,34 \cdot \Delta T$$

Siendo,

Q_v : Carga térmica por ventilación o infiltración de aire exterior (W)

V: Volumen del local a calefactar (m^3)

N: Número de renovaciones horarias (h^{-1}). En este caso, se considerará 1 renovación/hora para todas las estancias

0,34: Calor específico del aire en base al volumen ($\frac{W \cdot h}{m^3 \cdot K}$)

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior ($^{\circ}C$)

9.2.4 Ganancias de calor totales

La ganancia total de calor corresponde con la demanda de refrigeración (Q_f) que es la suma de la carga térmica por transmisión (Q_t), la carga térmica por ventilación o infiltración del aire exterior (Q_v) y la carga térmica por radiación solar:

$$Q_f = Q_t + Q_v + Q_s$$

Según esto, la demanda total de refrigeración obtenida para las peores condiciones posibles es de 6,817 kW. El cálculo de la demanda máxima de calefacción para todas las estancias se puede consultar en el "Anejo nº 02: Cálculo de la demanda energética".

9.3 Resumen de los cálculos de la demanda térmica máxima

En la siguiente tabla se muestra la demanda de calefacción y refrigeración obtenida para las peores condiciones climáticas:



Estancia	Demanda máxima de calefacción (W)	Demanda máxima de refrigeración (W)
Aseo	212	143
Lavadero	462	349
Cocina	516	473
Salón-comedor	3035	2728
Habitación 1	666	596
Habitación 2	689	611
Habitación 3	1088	993
Baño	450	409
Pasillo	606	515
Total	7724	6817

Tabla 9: Demanda energética de las estancias de la vivienda



10. ELECCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR

10.1 Determinación de la bomba de calor

La bomba de calor geotérmica se debe elegir de manera que sea capaz de abastecer los picos máximos de demanda térmica calculados en el epígrafe 9. Estas demandas son de 7,724 kW para calefacción y 6,817 kW para refrigeración. Por otra parte, deberá ser una bomba de calor reversible para poder hacer frente tanto a calefacción como a refrigeración. En el “Anejo nº 03: Características de la bomba geotérmica”, se recogen propiamente dichos, las características de la bomba de calor.

En la siguiente imagen se recogen siete modelos de bombas de la serie AGEO+ de la marca CIATESA. En este caso, la bomba elegida es la Ageo +30H.

BOMBA DE CALOR R-410A			
Modelo	Potencia frigorífica [kW]	Potencia calorífica [kW]	Precio [€]
Ageo+ 20H	5,9	7,4	6.006
Ageo+ 30H	7,6	9,4	6.735
Ageo+ 40H	9,2	11,5	6.959
Ageo+ 50H	12,2	15,3	7.802
Ageo+ 40HT	9,1	11,3	7.037
Ageo+ 50HT	12,8	16,1	7.324
Ageo+ 65HT	15,9	19,8	7.502

Figura 22: Potencias de las bombas Ageo+

La potencia calorífica está calculada según la norma EN14511 para agua caliente a 30/35 °C (evaporador a 12/7°C) y la potencia frigorífica se ha tomado para agua fría a 12/7°C (condensador a 30/35°C).

10.2 Fluido refrigerante

En una bomba de calor, el fluido refrigerante es el que transporta el calor desde el foco frío hasta el foco caliente. En el ciclo cerrado de compresión y expansión en el que trabaja la bomba de calor, el fluido refrigerante va a sufrir dos cambios de fase, uno en el evaporador y otro en el condensador. Hay que tener en cuenta que la temperatura exterior varía a lo largo del año y con ello la demanda térmica, por lo que también variarán las temperaturas de trabajo del refrigerante y las presiones a las que se produzcan los cambios de fase. Por ello, el fluido refrigerante debe tener unas propiedades caloríficas y físicas adecuadas al rango de uso previsto.

El fluido refrigerante de la bomba elegida es el R-410a. Es un refrigerante zeotrópico que contiene un 50% de R-32 (difluorometano: CH₂F₂) y un 50% de R-125 (pentafluoroetano: CHF₂CF₃). Al tratarse de una mezcla zeotrópica, su desplazamiento de temperatura es sólo de 0,1 °C, lo que hace una mezcla muy estable. Esto facilita la recarga después de cualquier fuga, pudiendo realizarse en fase líquida sin que se produzca ningún cambio de composición o rendimiento.



El fluido refrigerante de la bomba elegida es el R-410a. Es un refrigerante zeotrópico que contiene un 50% de R-32 (difluorometano: CH_2F_2) y un 50% de R-125 (pentafluoroetano: CHF_2CF_3). Al tratarse de una mezcla zeotrópica, su desplazamiento de temperatura es sólo de 0,1 °C, lo que hace una mezcla muy estable. Esto facilita la recarga después de cualquier fuga, pudiendo realizarse en fase líquida sin que se produzca ningún cambio de composición o rendimiento.

Las características físicas del R-410a son:

- Estado físico a 20 °C: Gas licuado
- Color: Incoloro
- Olor: Etéreo
- Lubricantes: El R-410a debe usarse con lubricantes que permitan un buen retorno al compresor. Pueden ser aceites de poliéster (POE) o de poliviniléter (PVE) con los que es miscible. En el caso de la bomba Ageo +30H se trata de POE
- Inflamabilidad en el aire: Ninguna
- Otros datos: El R-410a en estado gaseoso es más pesado que el aire. Puede acumularse en espacios confinados, particularmente al nivel del suelo o sótanos

Las propiedades termodinámicas son las que se recogen a continuación:

- Punto de ebullición (1,013 bar): -51,6 °C
- Presión de vapor (25 °C): 16,530 bar
- Temperatura crítica: 72,8 °C
- Presión crítica: 47,964 atm
- Calor latente de vaporización (1,013 bar): 271,5 kJ/kg
- Calor específico (25 °C líquido): 1,86 kJ / kg·K
- Calor específico (1,013 bar vapor): 0,82 kJ / kg·K

Actualmente, el R-410a es el principal fluido refrigerante destinado a reemplazar al R22 en aplicaciones de climatización de baja y media potencia. Tiene propiedades más favorables que el R22 en los intercambios térmicos y una capacidad frigorífica superior, lo que permite el uso de compresores de menor desplazamiento para obtener una misma potencia frigorífica. Sin embargo, los niveles de presión de trabajo del R-410a son más elevados y su temperatura crítica bastante baja, por lo que no es posible utilizar R-420a en equipos diseñados para R22.

El R-410a es considerado como un refrigerante de nueva generación. Éstos han sido desarrollados para sustituir a los CFCs y HCFCs ya que no contienen cloro en su composición. Por ello no atacan la capa de ozono, ni son tóxicos ni inflamables. Sin embargo, el factor de calentamiento global es muy elevado, siendo el del R-410a 1975 veces mayor que el del dióxido de carbono.



11. ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DEL TERRENO

La conductividad térmica del terreno es fácil de determinar a partir de valores tabulados, en función del tipo o tipos de rocas que conforman el terreno, y de calores obtenidos en ensayos de laboratorio con muestras de sondeos. Pero ninguno de éstos tienen en cuenta las condiciones naturales del terreno ni los efectos del flujo de agua subterránea. Para ello es necesario recurrir al ensayo de respuesta térmica del terreno.

El ensayo de respuesta térmica del terreno (TRT, Thermal Response Test) es un ensayo experimental con el que se puede calcular la temperatura real del terreno a lo largo del sondeo geotérmico y la conductividad térmica efectiva, teniendo en cuenta los distintos estratos geológicos atravesados, la influencia del flujo de agua subterránea, las sondas geotérmicas, etc.

El ensayo consiste en hacer circular un fluido intercambiador de calor por un sondeo hasta que se establezcan las temperaturas de entrada y salida. Seguidamente, se empieza a inyectar una cantidad de calor constante durante un período prolongado de tiempo de unas 50 o 60 horas. Durante la prueba se va haciendo un registro de los parámetros más significativos. Cuando la temperatura del fluido se mantenga constante se puede determinar la conductividad efectiva del terreno.

Puesto que para la realización de este trabajo no se dispone de los medios necesarios para llevar a cabo este ensayo, se determinará la conductividad térmica como una aproximación a partir de valores tabulados. Se supondrá que, al menos la profundidad hasta la que lleguen los sondeos geotérmicos, estará formada por un único estrato principalmente calizo.



12. DIMENSIONAMIENTO DEL SONDEO

12.1 Sondas geotérmicas

El sistema geotérmico de intercambio de calor seleccionado es el de sondas geotérmicas verticales en doble U. Los sondeos respetan la distancia mínima a la vivienda, que es de 2 metros, y la distancia mínima entre los propios sondeos, que es de 6 metros, separándolos una distancia de 10 metros. En el "Documento nº 2: Planos" se incluye la disposición de los sondeos en el terreno.

Respecto a la sonda geotérmica, se ha seleccionado una de polietileno reticulado (PEX-a) en doble U de 32 mm de diámetro y espesor 2,9 mm, unidas por su extremo inferior por un par de piezas del mismo material que constituyen el pie de sonda. Estas sondas se colocan en el interior de los sondeos verticales y por ellas circula el fluido caloportador. Para facilitar su introducción en el sondeo, se coloca un peso o lastre que cuelgue del pie de sonda.

La elección de un intercambiador geotérmico de polietileno reticulado (PEX-a) frente a otro de polietileno (PE 100) supone grandes ventajas en la instalación. Por una parte, el PEX-a soporta un rango de temperaturas de trabajo mayor y una mejora en las prestaciones físicas, químicas y mecánicas. Pero el factor más relevante es su vida útil, siendo de más de 50 años.

12.2 Fluido caloportador

El fluido caloportador es una solución de un producto anticongelante que circula por dentro de las tuberías que conforman el intercambiador geotérmico y que transporta el calor desde el terreno hasta la bomba de calor o viceversa. Para ello, debe cumplir con una serie de requisitos como son el punto de congelación, buenas propiedades termodinámicas, viscosidad, etc.

Se ha elegido como fluido caloportador una mezcla acuosa al 30 % m/m de etilenglicol. El etilenglicol es incoloro, inodoro y miscible con agua. Con un inhibidor de la corrosión, las soluciones con etilenglicol son poco volátiles y con bajo riesgo de inflamación. El principal inconveniente es que es tóxico y debe ser tratado cuidadosamente.

Las propiedades del fluido caloportador son:

Composición	Agua 70% + Etilenglicol 30% (peso)
Temperatura de congelación	-12.8 °C
Temperatura de ebullición	102 °C
Densidad (20 °C)	1046 kg/m ³
Calor específico (20 °C)	3672 J/kg·K
Conductividad térmica (20 °C)	0,48 W/m·K
Viscosidad dinámica (20 °C)	0,001428 Kg/m·s

Tabla 10: Propiedades del fluido caloportador



12.3 Longitud en profundidad de los sondeos

La guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, propone un método de cálculo de la longitud de las sondas geotérmicas basado en el análisis de temperaturas del fluido caloportador y del suelo, pues es debido a su diferencia que se produce transferencia de calor.

La longitud del intercambiador de calor enterrado se puede determinar para calefacción y refrigeración mediante las siguientes expresiones:

$$L_{\text{calefacción}} = \frac{Q_{\text{calefacción}} \cdot \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{\text{calefacción}})}{T_L - T_{\text{MIN}}}$$

$$L_{\text{refrigeración}} = \frac{Q_{\text{refrigeración}} \cdot \frac{\text{EER} + 1}{\text{EER}} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{\text{refrigeración}})}{T_{\text{MAX}} - T_H}$$

El cálculo de cada uno de los parámetros de los que depende se muestra en los siguientes apartados.

12.3.1 Temperaturas máximas y mínimas de la tierra

A partir de las ecuaciones siguientes es posible determinar la temperatura máxima (T_H) y mínima (T_L) que ocurren durante el ciclo anual para cualquier profundidad (X_S).

$$T_L = T_M - A_s \cdot e^{(-X_s \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}})}$$

$$T_H = T_M + A_s \cdot e^{(-X_s \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}})}$$

Siendo,

A_s : Oscilación de la temperatura superficial

T_M : Temperatura media anual del lugar

La oscilación de la temperatura superficial se puede asumir nula para sistemas verticales, debido a que las fluctuaciones diarias de la temperatura con la profundidad dejan de apreciarse después de 8 metros.

Por tanto, la temperatura máxima y mínima del suelo son iguales y su valor es igual a la temperatura media anual del lugar (T_M).

En este caso:

$$T_L = T_H = T_M = 17,60 \text{ }^\circ\text{C}$$



12.3.2 Temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor

El fluido geotérmico intercambia calor en el evaporador en invierno (calefacción) y en el condensador en verano (refrigeración) debido a la diferencia de temperaturas que existe entre el fluido geotérmico y el fluido de la bomba de calor.

La bomba de calor escogida (Ageo +30H, Grupo CIAT) trabaja con temperaturas en el evaporador en invierno entre 7 °C y 12 °C, mientras que en el condensador en verano trabaja entre 30 °C y 35 °C. Por tanto:

$$T_{\text{Min}} = 7 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Max}} = 35 \text{ °C}$$

12.3.3 Diferencia de temperaturas entre el circuito y el suelo

Para los ciclos de calefacción, se calcula como:

$$T_L - T_{\text{Min}} = 17,60 - 7 = 10,60 \text{ °C}$$

Para los ciclos de refrigeración, se calcula como:

$$T_{\text{Max}} - T_H = 35 - 17,60 = 17,40 \text{ °C}$$

12.3.4 Resistencia de los tubos al flujo de calor

Es posible calcular este parámetro a través de la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot K_p} \cdot \ln\left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}}\right)$$

Siendo,

D_{ext}: Diámetro exterior de los tubos

D_{int}: Diámetro interior de los tubos

K_p: 0,35 W/m·K es la conductividad térmica del material de los tubos

Por tanto:

$$R_p = 0,045 \text{ m} \cdot \text{K} / \text{W}$$

12.3.5 Resistencia de la tierra

La resistencia de la tierra (R_s) es la inversa de la conductividad térmica del terreno. Conociendo la composición del terreno de la zona se puede determinar su conductividad térmica.



Tal y como está explicado en el epígrafe 5.2 de este trabajo, el suelo de la zona donde se encuentra la vivienda corresponde principalmente a calizas pulverulentas, baldosas y hojosas.

De la guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, se extrae el dato de la conductividad térmica de dicho tipo de suelo. La siguiente tabla hace referencia a datos extraídos del libro “Geothermal energy and heat storage” de D. Paud del 2002:

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica (MJ/m ³ K)
	Mín.	Valor típico	Máx.	
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Mica esquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Halita	5-3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+10 °C)		0,58		4,19

Figura 23: Valores orientativos de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales

Obteniendo un valor de conductividad media de 2,8 W / m·K, la resistencia de la tierra es:

$$R_s = 0,36 \text{ m} \cdot \text{K/W}$$

12.3.6 Factor de utilización

Representa la fracción de tiempo que está en marcha la bomba de calor y, por tanto, el tiempo de funcionamiento estacional de la instalación.



La manera más sencilla de calcular la carga térmica es asumir que es una función lineal de la temperatura del aire exterior. Se deben tener cuatro puntos (dos para calefacción y dos para refrigeración) para poder determinar dicha función.

Por un lado, se conoce la carga máxima calorífica en invierno para una temperatura de aire exterior para la población de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la carga máxima frigorífica en verano para una temperatura de aire exterior de $42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, se puede asumir que el sistema sólo demandará calor en invierno cuando la temperatura del aire sea inferior a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ y, que solo demandará frío en verano cuando la temperatura del aire sea superior a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos son los cuatro puntos necesarios para calcular la función lineal y la gráfica correspondiente a su cálculo.

	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (kW)
Calefacción invierno	42	7,724
	21	0
Refrigeración verano	-5	6,817
	16	0

Tabla 11: Puntos característicos de la función lineal del factor de utilización

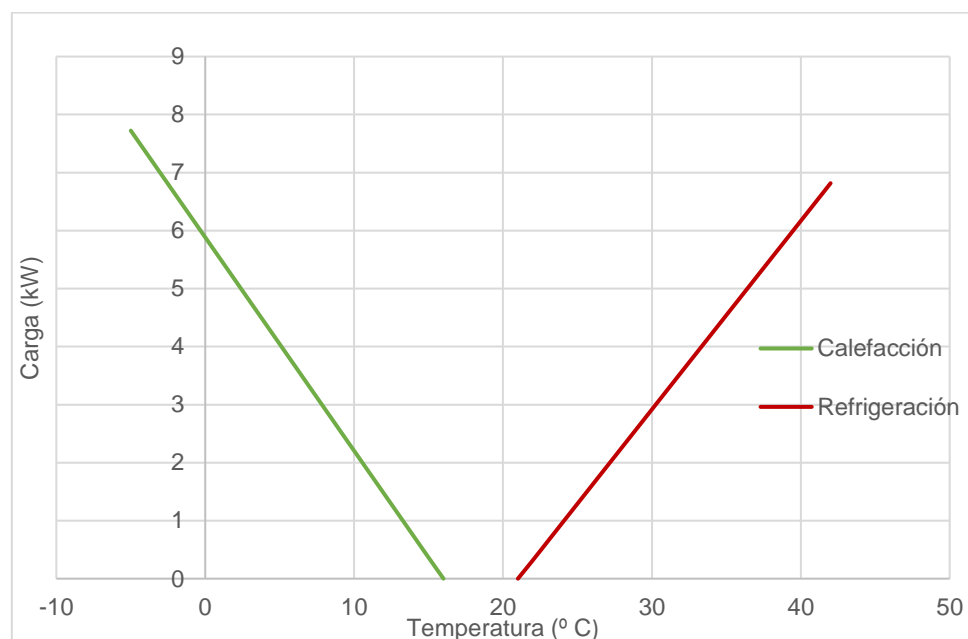


Figura 24: Variación de las cargas de calefacción y refrigeración en función de la temperatura

Las ecuaciones que rigen cada una de las funciones lineales son las siguientes:

Calefacción:

$$\text{Carga kW} = -0,368 \cdot \text{Temperatura} + 5,884$$

Refrigeración:

$$\text{Carga kW} = 0,325 \cdot \text{Temperatura} - 6,833$$



El factor de utilización de la bomba se define como el cociente entre el número de horas de marcha de la bomba de calor y el número de horas totales en el periodo deseado.

Para calcular el factor de utilización de la bomba se ha utilizado una hoja de cálculo, en el que figuran los siguientes campos:

- Mes: hace referencia al mes en que se calculan todos los parámetros. Para calefacción se calculará para Diciembre, Enero y Febrero, y para refrigeración será para Junio, Julio, Agosto y Septiembre
- Rango T: Intervalo de temperaturas exteriores entre las que se van a calcular los datos. Serán incrementos de 2 °C
- Text media: Es el valor medio del intervalo de temperaturas exteriores de cálculo
- Bin hours: Término que determina el número de horas que un rango de temperaturas determinado se da en un mes
- Carga del edificio: Carga térmica proporcional a la temperatura exterior media. Se calcula mediante las funciones lineales asumidas para calefacción y refrigeración (ecuaciones anteriores)
- Fracción marcha: Establece cuánta carga térmica, sobre el total calculado para valores extremos, se está usando en cada rango de temperaturas. Se calcula dividiendo la carga del edificio en cada rango de temperaturas (variable) entre la potencia de la bomba de calor (constante para cada uno de los modos de calefacción o refrigeración)
- Horas marcha: Tiempo en horas que la bomba de calor está funcionando en cada rango de temperaturas en un mes

Tras establecer la tabla de datos, es necesario sumar el número de horas en marcha y obtener su total.

Por otro lado, se suman las horas totales del periodo de calefacción (2160 horas en diciembre, enero y febrero) y refrigeración (2928 horas de junio, julio, agosto y septiembre) respectivamente. Dividiendo ambos términos se obtiene el factor de utilización para los dos periodos.

Los cálculos son los siguientes:

12.3.6.1 Cálculo de factor de utilización. Modo calefacción de invierno

Mes	Rango	Txtmedia	Bin hours	Carga Kw	Pot bomba	Fraccion marcha	Horas marcha
Diciembre	0 a 2	1	35	5.516	9.4	0.59	20.54
Diciembre	2 a 4	3	37	4.78	9.4	0.51	18.81
Diciembre	4 a 6	5	75	4.044	9.4	0.43	32.27
Diciembre	6 a 8	7	74	3.308	9.4	0.35	26.04
Diciembre	8 a 10	9	74	2.572	9.4	0.27	20.25
Diciembre	10 a 12	11	75	1.836	9.4	0.20	14.65
Diciembre	12 a 14	13	123	1.1	9.4	0.12	14.39
Diciembre	14 a 16	15	122	0.364	9.4	0.04	4.72
Diciembre	16 a 18	17	67	0	9.4	0.00	0.00



Diciembre	18 a 20	19	35	0	9.4	0.00	0.00
Diciembre	20 a 22	21	3	0	9.4	0.00	0.00

Enero	-2 a -0	-1	3	6.252	9.4	0.67	2.00
Enero	0 a 2	1	8	5.516	9.4	0.59	4.69
Enero	2 a 4	3	31	4.78	9.4	0.51	15.76
Enero	4 a 6	5	93	4.044	9.4	0.43	40.01
Enero	6 a 8	7	138	3.308	9.4	0.35	48.56
Enero	8 a 10	9	102	2.572	9.4	0.27	27.91
Enero	10 a 12	11	125	1.836	9.4	0.20	24.41
Enero	12 a 14	13	107	1.1	9.4	0.12	12.52
Enero	14 a 16	15	68	0.364	9.4	0.04	2.63
Enero	16 a 18	17	26	0	9.4	0.00	0.00
Enero	18 a 20	19	15	0	9.4	0.00	0.00
Enero	20 a 22	21	4	0	9.4	0.00	0.00

Febrero	2 a 4	3	4	4.78	9.4	0.51	2.03
Febrero	4 a 6	5	23	4.044	9.4	0.43	9.89
Febrero	6 a 8	7	50	3.308	9.4	0.35	17.60
Febrero	8 a 10	9	100	2.572	9.4	0.27	27.36
Febrero	10 a 12	11	157	1.836	9.4	0.20	30.67
Febrero	12 a 14	13	139	1.1	9.4	0.12	16.27
Febrero	14 a 16	15	128	0.364	9.4	0.04	4.96
Febrero	16 a 18	17	76	0	9.4	0.00	0.00
Febrero	18 a 20	19	37	0	9.4	0.00	0.00
Febrero	20 a 22	21	6	0	9.4	0.00	0.00

Total horas marcha	438.96
Total horas meses	2160
Fracción horas marcha	0.203

12.3.6.2 Cálculo de factor de utilización. Modo refrigeración de verano

Mes	Rango	Txtmedia	Bin hours	Carga Kw	Pot bomba	Fraccion marcha	Horas marcha
Junio	14 a 16	15	12	-1.958	7.6	0.00	0.00
Junio	16 a 18	17	20	-1.308	7.6	0.00	0.00
Junio	18 a 20	19	24	-0.658	7.6	0.00	0.00
Junio	20 a 22	21	93	-0.008	7.6	0.00	0.00
Junio	22 a 24	23	132	0.642	7.6	0.08	11.15
Junio	24 a 26	25	117	1.292	7.6	0.17	19.89
Junio	26 a 28	27	85	1.942	7.6	0.26	21.72
Junio	28 a 30	29	150	2.592	7.6	0.34	51.16



Junio	30 a 32	31	68	3.242	7.6	0.43	29.01
Junio	32 a 34	33	14	3.892	7.6	0.51	7.17
			5				
Julio	14 a 16	15	1	-1.958	7.6	0.00	0.00
Julio	16 a 18	17	8	-1.308	7.6	0.00	0.00
Julio	18 a 20	19	25	-0.658	7.6	0.00	0.00
Julio	20 a 22	21	42	-0.008	7.6	0.00	0.00
Julio	22 a 24	23	169	0.642	7.6	0.08	14.28
Julio	24 a 26	25	167	1.292	7.6	0.17	28.39
Julio	26 a 28	27	128	1.942	7.6	0.26	32.71
Julio	28 a 30	29	140	2.592	7.6	0.34	47.75
Julio	30 a 32	31	24	3.242	7.6	0.43	10.24
Julio	32 a 34	33	14	3.892	7.6	0.51	7.17
Julio	34 a 36	35	2	4.542	7.6	0.60	1.20

Agosto	16 a 18	17	2	-1.308	7.6	0.00	0.00
Agosto	18 a 20	19	31	-0.658	7.6	0.00	0.00
Agosto	20 a 22	21	63	-0.008	7.6	0.00	0.00
Agosto	22 a 24	23	143	0.642	7.6	0.08	12.08
Agosto	24 a 26	25	173	1.292	7.6	0.17	29.41
Agosto	26 a 28	27	151	1.942	7.6	0.26	38.58
Agosto	28 a 30	29	114	2.592	7.6	0.34	38.88
Agosto	30 a 32	31	30	3.242	7.6	0.43	12.80
Agosto	32 a 34	33	9	3.892	7.6	0.51	4.61
Agosto	34 a 36	35	3	4.542	7.6	0.60	1.79
Agosto	36 a 38	37	1	5.192	7.6	0.68	0.68

Septiembre	14 a 16	15	14	-1.958	7.6	0.00	0.00
Septiembre	16 a 18	17	65	-1.308	7.6	0.00	0.00
Septiembre	18 a 20	19	124	-0.658	7.6	0.00	0.00
Septiembre	20 a 22	21	137	-0.008	7.6	0.00	0.00
Septiembre	22 a 24	23	129	0.642	7.6	0.08	10.90
Septiembre	24 a 26	25	128	1.292	7.6	0.17	21.76
Septiembre	26 a 28	27	69	1.942	7.6	0.26	17.63
Septiembre	28 a 30	29	27	2.592	7.6	0.34	9.21
Septiembre	30 a 32	31	12	3.242	7.6	0.43	5.12
Septiembre	32 a 34	33	7	3.892	7.6	0.51	3.58
Septiembre	34 a 36	35	8	4.542	7.6	0.60	4.78

Total horas marcha	493.64
Total horas meses	2880
Fracción horas marcha	0.171



12.3.7 Longitud del intercambiador enterrado

Una vez calculados todos los parámetros se procede al cálculo de la longitud del intercambiador enterrado para los modos de calefacción y refrigeración respectivamente.

Para invierno, la longitud del intercambiador viene definida por la siguiente expresión:

$$L_{\text{calefacción}} = \frac{Q_{\text{calefacción}} \cdot \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{\text{calefacción}})}{T_L - T_{\text{MIN}}}$$

Siendo,

$Q_{\text{calefacción}}$: 9,4 kW

COP = 5

R_p : 0,045 m · K/W

R_s : 0,36 m · K/W

$F_{\text{calefacción}}$: 0,203

$T_L - T_{\text{MIN}}$: 10,60 °C

Se obtiene una longitud necesaria de intercambio:

$$L_{\text{calefacción}} = 83,80 \text{ m}$$

Para verano, la longitud necesaria de intercambio es:

$$L_{\text{refrigeración}} = \frac{Q_{\text{refrigeración}} \cdot \frac{\text{EER} + 1}{\text{EER}} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{\text{refrigeración}})}{T_{\text{MAX}} - T_H}$$

Siendo,

$Q_{\text{refrigeración}}$: 7,6 kW

EER = 4

R_p : 0,045 m · K/W

R_s : 0,36 m · K/W

$F_{\text{refrigeración}}$: 0,171

$T_{\text{MAX}} - T_H$: 17,40 °C

Se obtiene una longitud necesaria de intercambio:

$$L_{\text{refrigeración}} = 58,20 \text{ m}$$

La longitud de los sondeos es la necesaria para que la bomba se calor funcione en correctas condiciones. Para determinar cuántos metros debe medir el sondeo, debe utilizarse la longitud más desfavorable, que es la de calefacción.



Se tienen tubos en doble U, por lo que la longitud del sondeo será

$$L_{\text{sondeo}} = 83,80 / 2 = \mathbf{41,90 \text{ m}}$$

Las sondas serán cuatro tubos de longitud 50 metros. Se realizará una perforación 50 metros de profundidad, con un diámetro mínimo de 150 mm para facilitar la correcta introducción de las sondas.

La perforación se realizará mediante la tecnología más adecuada para cada tipo de terreno. Únicamente en casos extremos de colapso del terreno o de existencia de coqueas se procederá al encamisado metálico.

Es muy importante realizar una correcta evacuación del detritus, por lo que el perforador deberá prever los elementos necesarios: zanjas, balsas de lodos, bomba de achique, plásticos para cubrir elementos constructivos circundantes, etc.

Inmediatamente después de la retirada del varillaje se procederá a la introducción de las sondas geotérmicas en la perforación, con el objetivo de evitar colapsos.

Los extremos salientes de tubería permanecerán protegidos con los tapones que llevan de fábrica para evitar la introducción de cualquier partícula, hasta la realización de las pruebas de presión correspondientes.

12.4 Relleno

Una vez terminado el sondeo e insertadas las sondas, el espacio vacío entre los tubos y la pared del sondeo deben rellenarse inyectando una suspensión de bentonita con cemento para evitar el riesgo de que se filtre el agua.

Esta suspensión de bentonita y cemento es inyectada de abajo a arriba en el sondeo por medio de un tubo suplementario con el fin de evitar bolsas de aire y asegurar un buen contacto térmico entre el fluido caloportador y el terreno.



13. SOLDADURA DE TUBOS DE POLIETILENO

La soldadura de tubos de polietileno se realiza por electrofusión. Esta soldadura se produce al hacer pasar corriente eléctrica a baja tensión (entre 8 y 48 V según modelo) por las espiras metálicas de los accesorios electrosoldables, se origina un calentamiento (efecto Joule) que suelda el tubo con el accesorio. La gama va desde DN 20 a 800 mm.



Figura 25: Soldadura con accesorios electrosoldables

13.1 Ventajas de la soldadura por electrofusión

- Seguridad respecto a las uniones ya que son fiables y duraderas
- Ideales para soldar tubos de pequeños diámetros
- Se mantiene la misma sección interior, es decir, se mantiene la capacidad de transporte de caudal que el tubo original
- Buena técnica cuando las condiciones son difíciles
- No requiere movimiento de los tubos durante la soldadura
- Tiempo de preparación corto y fácil de realizar
- Las máquinas automáticas permiten minimizar errores de soldaduras
- Es posible soldar tubos de diferente diámetro y grosor

13.2 Causas de error de la soldadura por electrofusión

- Por no raspar el tubo
- Interrupción del ciclo de fusión
- Contaminación de la superficie de los tubos o de los accesorios
- Tubo excesivamente ovalado y no haber utilizado redondeador
- Movimientos no deseados durante la fusión
- No haber cortado los extremos de los tubos perpendiculares
- Preparación insuficiente
- Introducción incorrecta del voltaje a la máquina
- No respetar el tiempo de enfriamiento



14. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA

14.1 Pruebas de presión y purgado en el intercambiador

Una vez introducidas las sondas geotérmicas en las perforaciones y antes de proceder al relleno de las mismas, se realizarán las correspondientes pruebas de presión. Para ello, se seguirán los siguientes pasos:

- Se limpiará el interior de las tuberías con agua a presión con el fin de eliminar las posibles partículas que se hayan introducido durante la instalación, así como para purgar las tuberías. El purgado se considerará correcto cuando el agua de salida sea transparente en vez de blanca.

Para un correcto test de purgado, es necesario que la velocidad del agua en la tubería sea como mínimo de 0,6 m/s, lo que implica los siguientes caudales en función de los diámetros de sondas empleados:

DN (mm)	Q (m ³ /h)
25	0,7
32	1,2
40	1,8

Figura 26: Caudales en función de los diámetros de sondas

- Se realizará una prueba conjunta de estanqueidad y resistencia en cada sonda geotérmica con las siguientes premisas:
 - La presión de prueba será como mínimo 3 veces la presión de servicio y como máximo el 80% de la presión nominal de la tubería
 - El tiempo de duración de la prueba será 1 hora
 - La caída de presión máxima admisible será del 3%

En los primeros minutos de la prueba se esperará a la correcta estabilización del manómetro, presurizando si es necesario hasta la presión mínima convenida.



15. PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS

Antes de poner en funcionamiento el sistema, se deben realizar los siguientes procesos y comprobaciones para asegurar el buen funcionamiento de la instalación:

- Limpieza del circuito de tuberías
- Purga del aire de la instalación
- Verificación de las condiciones de diseño: presión y caudal
- Carga del intercambiador de calor con anticongelante (cuando sea necesario)
- Presurización de la instalación
- Puesta en marcha de la bomba de calor y comprobación de parámetros

15.1 Limpieza y purga del sistema

Antes de realizar la purga del sistema, la prueba de estanqueidad y de efectuar el llenado definitivo, las redes de tuberías de agua deben ser limpiadas internamente para eliminar los residuos procedentes del montaje.

Para el purgado de la instalación se introducirá el agua en el sistema de tuberías a una velocidad de 0,6 m/s, eliminando por completo cualquier burbuja de aire atrapada. Si la bomba de circulación de la instalación no está diseñada para alcanzar esas especificaciones, se conectará un grupo hidráulico externo (unidad de purga) que servirá también para la introducción (en su caso) de anticongelante, como se observa en la siguiente figura:

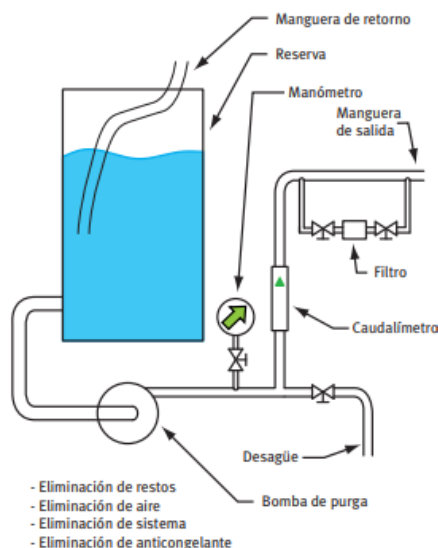


Figura 27: Unidad de purga

La unidad de purga se conectará al bucle usando mangueras flexibles y abrazaderas. Esta conexión será como un sistema de bucle cerrado, de manera que el intercambiador de calor enterrado se limpie independientemente de la bomba de calor agua-agua, como se muestra en las siguientes figuras:

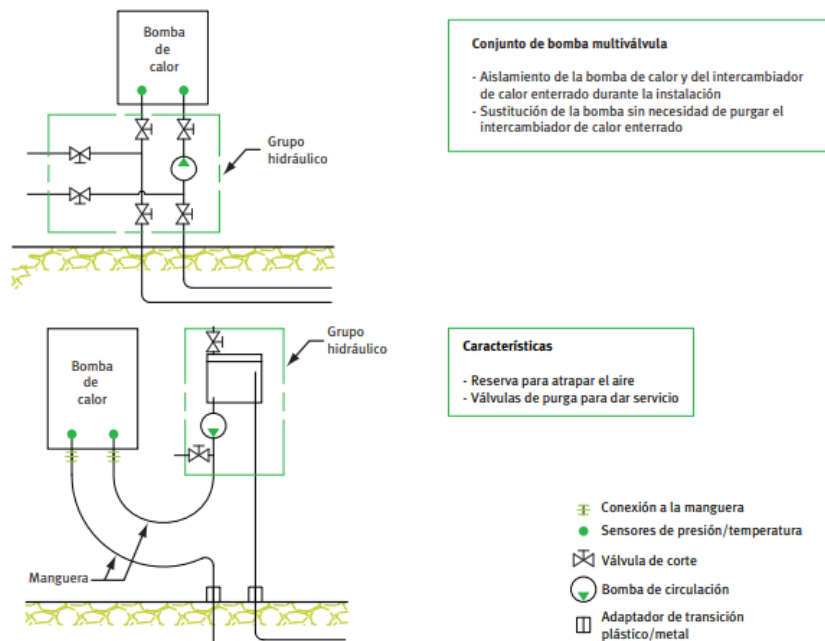


Figura 28: Conexiones de la unidad de purga

En el siguiente esquema se describen los pasos a realizar para efectuar el purgado de la instalación mediante la unidad de purga externa:

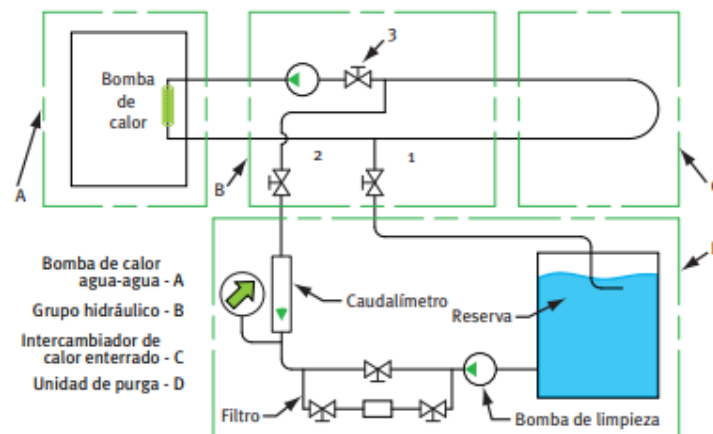


Figura 29: Purgado de la instalación

1. Conexión del desagüe de la unidad de purga a la válvula 2, situada en la ida de la bomba de calor
2. Conexión de la manguera de retorno a la válvula 1 (retorno de la bomba de calor)
3. Apertura de las válvulas 1 y 2
4. Cierre de la válvula 3 para aislar el procedimiento de purga de la bomba de calor
5. Encendido de la unidad de purga. El caudal a través del intercambiador de calor circulará en dirección opuesta a la de operación normal
6. La purga de aire se habrá efectuado completamente cuando de la manguera sumergida en el depósito auxiliar no surjan burbujas de aire



7. Después de que se haya efectuado la purga del intercambiador de calor enterrado se abrirá la válvula 3 para permitir que una parte del caudal pase a través del sistema de bombeo para limpiarlo y purgarlo

15.2 Pruebas de estanqueidad y resistencia de la instalación

Se realizará una prueba preliminar de estanqueidad para detectar fallos de continuidad de la red y evitar los daños que podría provocar la prueba de resistencia mecánica. Para ello, se empleará el mismo fluido transportado, generalmente agua, a la presión de llenado. Esta prueba tendrá la duración suficiente para verificar la estanqueidad de todas las uniones.

A continuación de la prueba preliminar de estanqueidad, una vez llenada la red con el fluido de prueba, se someterá a las uniones a un esfuerzo por la aplicación de la presión de prueba. La presión de prueba será equivalente a 1,5 veces la presión máxima efectiva de trabajo a la temperatura de servicio, con un mínimo de 6 bar. La prueba hidráulica de resistencia mecánica tendrá la duración suficiente para verificar visualmente la resistencia estructural de los equipos y tuberías sometidos a la misma.

La reparación de las fugas detectadas se realizará desmontando la junta, accesorio o sección donde haya originando la fuga y sustituyendo la parte defectuosa o averiada con material nuevo. Una vez reparadas las anomalías, se volverá a comenzar desde la prueba preliminar. El proceso se repetirá tantas veces como sea necesario, hasta que la red sea estanca.

15.3 Puesta en marcha de la bomba de calor

Una vez que se haya limpiado, agregado el anticongelante y presurizado el sistema se realizará la puesta en marcha de la bomba de calor.

Se probará la instalación en todos sus modos de funcionamiento durante el tiempo suficiente, comprobando temperaturas de ida y retorno del intercambiador enterrado, presiones, caudal en el circuito y potencia eléctrica absorbida.



16. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE SUELO RADIANTE

El sistema de climatización por suelo radiante es aquel que puede mantener alguna superficie del interior de cualquier edificación a una temperatura controlada, ya sea fría o caliente, para contrarrestar los flujos de calor que penetran en la edificación a través de los cerramientos, por renovación del aire o por infiltraciones del aire exterior. El suelo radiante establecerá intercambios de calor por radiación con el cuerpo humano y el resto de elementos y superficies que se encuentren dentro de su radio de afección y a su vez, también se producirán intercambios convectivos con el aire del ambiente.

La superficie más fácil y útil de radiar es el suelo, ya que las paredes normalmente están cubiertas por muebles y otros elementos.

En un sistema de acondicionamiento térmico por suelo radiante se podrá controlar la temperatura radiante media del entorno del sujeto e indirectamente la temperatura del aire, que corresponde a la temperatura operativa de confort.

La sensación de frío se empieza a notar por los pies, pero si la temperatura es elevada, el cuerpo humano percibe una sensación de malestar a causa de la respiración de aire caliente. Por eso, es recomendable una temperatura de 24 °C en la zona de los pies y una temperatura de 18 °C a una altura de 1,80 metros. De este modo, se puede afirmar que se conseguirá una sensación de confort y a su vez se respirará aire fresco.

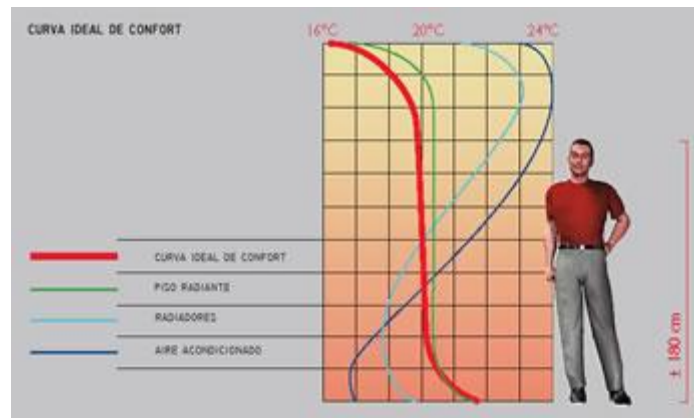


Figura 30: Curvas de confort térmico

Los elementos principales que conforman una instalación de suelo radiante son:

- **Panel aislante:** Se coloca encima del forjado y soporta los circuitos de suelo radiante y los aísla térmicamente. Suelen ser de poliestireno expandido (EPS)
- **Tubería:** Es el elemento por el que circula el agua a distintas temperaturas en función del modo de uso, ya sea calefacción o refrigeración. Suelen ser tuberías de polietileno reticulado, material que presenta buenas características técnicas
De forma estándar, se instalarán tuberías de 16 mm de diámetro y 1,8 mm de espesor y se dispondrán en espiral con un paso de 15 cm



- **Colectores:** A través de estos elementos, se conectan las tuberías de distribución procedentes de la bomba de calor con los diferentes circuitos que conforman el suelo radiante

Las ventajas que ofrece este sistema de distribución de calor en la vivienda son:

- La reducción de 25 °C que conlleva la calefacción por suelo radiante en comparación con otros sistemas, representa una disminución considerable en cuanto a las pérdidas térmicas liberadas en zonas donde no se necesita aportar calor o en zonas de especial pérdida energética como son las esquinas o discontinuidades en los puentes térmicos de la vivienda
- En las zonas climatizadas por este sistema se consiguen temperaturas más uniformes.
- Se eliminan las zonas frías y las zonas calientes
- La temperatura del techo es considerablemente inferior en el sistema de suelo radiante, y se consigue una disminución de hasta 10 °C en comparación con otros sistemas como podría ser cualquier tipo de climatización convectiva
- La velocidad de circulación del aire es muy pequeña (0,05 m/s) y no conlleva ningún movimiento de polvo ni oscurecimiento de las paredes como es el caso de sistemas de climatización por aire
- Los radiadores de pared solo radian entre un 10 y un 30% y el resto de calor es emitido por convección. En un suelo radiante, la climatización por radiación supone el 60%. En relación con esto, mediante el suelo radiante se consiguen temperaturas de confort de 20 °C, mientras que con radiadores es de 22 °C a causa del importante flujo de aire formado por la convección y que provoca renovaciones incontroladas de aire
- La mayor inercia térmica de la climatización por suelo radiante permite aprovechar las aportaciones extremas de calor como podrían ser las procedentes de la radiación solar, la de aparatos que emitan calor o la de las personas que se encuentren en la vivienda. A su vez, el sistema se autorregula redistribuyendo el calor, ya que el sistema de tubos absorbe la temperatura de las zonas más calientes y las reparte a otras superficies

Una vez realizada la instalación de suelo radiante, éste quedará tal y como se muestra en la siguiente figura:

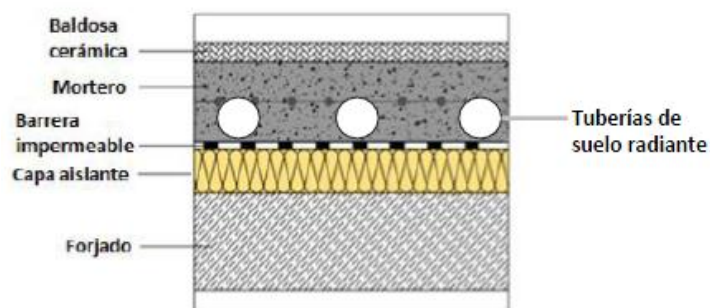


Figura 31: Detalle constructivo de la instalación de suelo radiante



Cada estancia de la vivienda contará con su propio circuito independiente, posibilitando de este modo la regulación de temperaturas de cada estancia de forma independiente. La longitud de cada uno de los circuitos se calcula de la siguiente manera:

$$L = \frac{A}{e}$$

Siendo,

L: Longitud del circuito de suelo radiante (m)

A: Superficie de la estancia que vaya a ocupar el circuito (m²)

e: Distancia entre tubos (m). Se instalarán todos los circuitos en espiral con un paso de 15 cm.

En la tabla 12 se recogen las longitudes de cada circuito de suelo radiante y la longitud total que habría que instalar:

Estancia	Superficie (m ²)	Longitud (m)
Aseo	3.15	21.00
Lavadero	6.45	43.00
Cocina	7.07	47.13
Salón-comedor	35.34	235.60
Habitación 1	9.60	64.00
Habitación 2	10.00	66.67
Habitación 3	12.98	86.53
Baño	4.54	30.27
Pasillo	6.25	41.67
Total		635.87

Tabla 12: Longitud de tubo de suelo radiante

16.1 Temperatura del agua

La temperatura del agua que recorre las tuberías de suelo radiante se calcula individualmente para cada local según las siguiente fórmula:

$$Q = S \cdot U \cdot (T_{ma} - T_i)$$

Siendo,

Q: Demanda térmica de cada estancia (W)

S: Superficie de cada estancia (m²)

T_{ma}: Temperatura del agua que circula por el suelo radiante (°C)



T_i : Temperatura de cada estancia (°C)

U: Coeficiente de transmisión térmica. Este coeficiente engloba la transmisión de calor por conducción, convección y por radiación. Su cálculo se explica más detalladamente en el siguiente apartado ($\frac{w}{m^2 \cdot k}$)

16.1.1 Cálculo del coeficiente de transmisión térmica

El cálculo del coeficiente de transmisión térmica U se realiza de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{\sum \left(\frac{e_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha}}$$

Siendo,

e_i : Espesor de la capa material "i" por encima del tubo de suelo radiante (m)

λ_i : Conducción del material "i" por encima del tubo de suelo radiante ($\frac{w}{m \cdot k}$)

α : Coeficiente de transmisión de calor que contiene las componentes de radiación y de convección. En el rango de temperaturas del suelo radiante se puede tomar un valor de $12 \frac{w}{m^2 \cdot k}$

Por encima de los tubos del suelo radiante sólo se encuentran el mortero y las baldosas de cerámica. El cálculo del coeficiente "U" se detalla en la siguiente tabla:

	Espesor (m)	Conductividad " λ " [$w/(m \cdot k)$]	U [$w/(m^2 \cdot k)$]= 7.96081
Baldosa	0.012	0.81	
Mortero	0.03	1.3	
Tubo	0.0018	0.41	

Tabla 13: transmitancia térmica

16.1.2 Calefacción

La estimación de la temperatura de impulsión del agua circulante por el suelo radiante en modo calefacción, considerando el valor "U" obtenido en el apartado anterior, se recoge en la siguiente tabla:



Estancia	Superficie (m ²)	Q (W)	T _{ma} (°C)
Aseo	3.15	212	29.45
Lavadero	6.45	462	30.00
Cocina	7.07	516	30.17
Comedor	35.34	3035	31.79
Habitación 1	9.60	666	29.72
Habitación 2	10.00	689	29.66
Habitación 3	12.98	1088	30.53
Baño	4.54	450	33.45
Pasillo	6.25	606	32.18

Tabla 14: Temperatura del agua en calefacción

La temperatura de impulsión vendrá determinada por la máxima temperatura que, en este caso, viene dada por el baño 33,45 °C. Es por eso que se ha escogido una temperatura de impulsión de **34 °C**.

16.2 Temperatura de refrigeración

El sistema de refrigeración es inexistente, ya que la caldera de gasoil solo calienta agua mientras que, la bomba de calor puede actuar como sistema de refrigeración.

Respecto a la refrigeración, existe el problema de la condensación de vapor de agua del aire sobre el pavimento. Para evitar este fenómeno no deseado, la temperatura del agua del suelo radiante no ha de superar el punto de rocío del agua.

El punto de rocío (t_d) es la temperatura a la que el vapor de agua contenido en el aire empieza a condensarse, ya que, con un determinado porcentaje de humedad relativa, el aire llega a su punto de saturación..

Siguiendo la guía MetAs, para el cálculo de la temperatura de rocío, primero habrá que conocer la presión de saturación del agua a la temperatura del ambiente:

$$e_s(t) = \exp\left[\ln(611,2) + \left(\frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}\right)\right]$$

Siendo,

e_s : presión de saturación del vapor de agua (Pa)

t: temperatura ambiente (°C)

Una vez determinada la presión de saturación del vapor a temperatura ambiente, se procede a calcular la presión parcial de vapor de agua a partir de la humedad relativa (HR) con la siguiente ecuación:

$$e = \frac{\%HR}{100} \cdot e_s(t)$$



Siendo,

e: presión de vapor de agua (Pa)

HR: Humedad relativa en tanto por ciento. Se considera un valor ideal de humedad del 50%

Dado que la temperatura de rocío es aquella en la cual se alcanza la presión de saturación del vapor del aire, se da la siguiente igualdad:

$$e = e_s(t_d)$$

De manera que:

$$e_s(t_d) = \exp^{\left[\ln(611,2) + \left(\frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t}\right)\right]}$$

Despejando t_d :

$$t_d = \frac{243,12 \cdot \ln(e) - 1559,72}{24,035 - \ln(e)}$$

Siendo,

t_d : temperatura de punto de rocío

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos sustituyendo los parámetros correspondientes de la vivienda de este trabajo:

RESULTADOS		
t	24	°C
$e_s(t)$	2976.26	Pa
HR	50	%
e	1488.13	Pa
t_d	12.93	°C

Tabla 15: Cálculo de temperatura de rocío

Tras los datos anteriores, se puede afirmar que para las anteriores condiciones de temperatura y humedad relativa no se puede enfriar el agua del suelo radiante a una temperatura inferior a 13 °C, ya que superar este límite implicaría condensación al pavimento y lo haría resbaladizo.

Por otro lado, hay zonas de la vivienda, como la cocina o los baños, donde la humedad relativa es más elevada, de manera que habrá que controlar más continuamente estos circuitos independientes.

El valor tomado de humedad relativa ideal de 50% puede ser superado en días de verano en que las condiciones climáticas favorecen un aumento de la humedad y, es por eso, que se aplicará un margen de seguridad del 15%, de manera que se fijará una temperatura de refrigeración máxima de **15 °C**.



17. CONCLUSIONES

Se puede concluir que una instalación geotérmica de muy baja entalpía supone una inversión inicial elevada (tal y como se estudiará a continuación), pero que una vez amortizada los gastos de energía eléctrica del compresor y de mantenimiento son mínimos en comparación con otros tipos de instalaciones con caldera convencional.

Las grandes ventajas que ofrece la utilización de esta energía son:

- Ahorro energético medio del 50% en la factura de electricidad, lo que supone un bajo consumo
- Costes de mantenimiento mínimos frente a los sistemas tradicionales y aumento de la vida útil del equipo de climatización
- Reducción de emisiones de CO₂ en torno al 50%
- Funciona las 24 horas del día independiente de las condiciones climatológicas
- La geotermia es un sistema que produce energía de forma regular y estable, sin variaciones porque no le afecta el clima
- Calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria en un solo sistema
- El mantenimiento de la geotermia es escaso
- No afecta estéticamente a una vivienda, ya que el sistema se encuentra enterrado

Pero a su vez, también presenta algunos inconvenientes:

- Su principal inconveniente es la elevada inversión inicial que hay que realizar para la instalación del sistema
- El periodo medio de amortización del sistema está entorno a los 6-7 años, lo que resulta muy elevado en comparación con otros sistemas
- La energía geotérmica no se puede transportar, debe consumirse en el mismo sitio donde se produce



18. BIBLIOGRAFÍA

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) <http://www.idae.es/>
- Código Técnico de la Edificación (CTE) <https://www.codigotecnico.org/index.html>
- Verein Deutscher Ingenieure (2001): VDI 4640. Thermal use of the underground. VDI-Gesellschaft Energietechnik. Düsseldorf.
- Ayuntamiento de Carlet <http://www.carlet.es/>
- Meteorología de Carlet <http://www.meteocarlet.com/>
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) <http://www.igme.es/>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA) <https://www.mapama.gob.es/es/>
- IDAE (2012). *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*.
- Manual Técnico de Aplicaciones de Calefacción y Climatización. Uponor. (2013).
- La Guía MetAs. (2007). "Temperatura de Rocío". MetAs y Metrólogos Asociados. México. Noviembre 2007.
- Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos (AseTUB). *Informe Técnico de soldadura térmica en tuberías de polietileno (PE)*.
- LÓPEZ JIMENO, C. *El subsuelo como fuente de energía. Instalaciones geotérmicas*.
- ESPADA SERRANO, V. *Estudio de instalaciones de climatización geotérmicas en viviendas*.
- Fundación laboral de la construcción. (2016). *Instalaciones de geotermia*.
- Instituto de la Construcción de Castilla y León (ICCL). Código Técnico de la Edificación Web. (2007). *Transmitancia térmica de materiales*.
- LÓPEZ LÓPEZ, J. *Diseño y cálculo de la climatización de una vivienda unifamiliar mediante energía geotérmica*.
- GARRIDO LÓPEZ, E. (2014). *Diseño de una vivienda unifamiliar con instalación geotérmica de muy baja entalpía*.
- GRUPO CIAT. Ageo Caleo. *Equipos agua-agua*.
- ADRASE. *Acceso a datos de radiación solar de España*.