



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Análisis de la viabilidad de un sistema de
energía geotérmica en una vivienda
unifamiliar**

Autor:

Gil Pérez-Hickman, Eduardo

Tutor:

Dr. Julio Francisco San José Alonso

**Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Cotutor:

D. Alfonso Calderón Vezanzones

Valladolid, Julio 2014.

Resumen

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el cálculo y dimensionamiento de una instalación térmica para la producción de ACS, calefacción y refrigeración por suelo radiante/refrescante. Para ello se emplea una bomba de calor geotérmica, que aprovecha la energía de baja entalpía del terreno a partir de un sistema de captación vertical, para una vivienda unifamiliar que se encuentra en el barrio Covaresa, de la localidad de Valladolid.

El presente trabajo incluye un estudio económico que compara los costes que implica la instalación geotérmica con los de otros sistemas convencionales. Además se analiza el tiempo requerido para amortizar dicha instalación. Por otro lado se realiza un estudio ambiental fundamentado en la comparación de las emisiones de CO₂ que produce cada sistema.

Palabras claves: Geotermia, Bomba de calor, Suelo radiante/refrescante, Estudio económico-ambiental, Perforación vertical.

Abstract

The aim of this degree final Project (DFP) is the calculation and the dimensioning of a thermal installation for the production of sanitary hot water, underfloor heating and cooling systems. To do this, a geothermal heat pump is applied because it harnesses the energy of low geothermal enthalpy of the subsoil from a system of vertical probes to a single-family house that is located in the area Covaresa of Valladolid.

The present paper deals with an economic study which compares the costs that carry out the geothermal installation with the other conventional systems. Furthermore, the time required to amortize such geothermal installation is analyzed. In the other hand, an environmental study based on the comparison of CO₂ emissions that are caused by each system has also carried out.

Keywords: Geothermal, Heat pump, Underfloor heating/cooling, Economic-environmental study, Vertical probes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	I
Abstract.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Resumen del trabajo presentado	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Antecedentes	3
1.4. Justificación.....	4
CAPÍTULO II: LA ENERGÍA GEOTÉRMICA	9
2.1. Definición de la Energía Geotérmica	9
2.2. Gradiente térmico	9
2.3. Recursos y yacimientos geotérmicos.....	11
2.4. Clasificación de los yacimientos geotérmicos.....	11
2.4.1. Yacimientos de alta entalpía.....	12
2.4.2. Yacimientos de media entalpía.....	13
2.4.3. Yacimientos de baja entalpía	13
2.4.4. Yacimientos de muy baja entalpía.....	13
2.5. Aplicaciones de la energía geotérmica.....	15
2.5.1. Usos térmicos.....	16
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA.....	23
3.1. Distribución de la vivienda	23
3.2. Localización y orientación	26
3.3. Condiciones climatológicas.....	27
3.4. Condiciones geológicas	28
3.5. Normativa aplicable.....	29
CAPÍTULO IV: CARGAS TÉRMICAS	31
4.1. Condiciones interiores de la vivienda.....	31
4.2. Condiciones exteriores de diseño	32
4.3. Caracterización térmica de la vivienda.....	32
4.3.1. Transmitancia límite de los cerramientos de la vivienda.....	32
4.3.2. Clasificación de los espacios de la vivienda	35

4.3.3.	Definición de la envolvente térmica del edificio y clasificación de sus componentes.....	35
4.4.	Cálculo de cargas térmicas	41
4.4.1.	Cargas térmicas de calefacción	42
4.4.2.	Cargas térmicas de refrigeración	43
4.4.3.	Módulo de cargas.....	46
CAPÍTULO V: SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....		57
5.1.	Sistema de climatización a partir de suelo radiante/refrescante	57
5.2.	Dimensionamiento del suelo radiante.....	61
5.2.1.	Parámetros básicos	61
5.2.2.	Diseño	63
5.2.3.	Características del sistema de distribución de la vivienda	64
5.3.	Distribución del suelo radiante	69
CAPÍTULO VI: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO		73
6.1.	Introducción.....	73
6.2.	Tipos de bombas de calor geotérmicas.....	74
6.2.1.	Según el tipo de fuente de calor y el fluido de distribución local	74
6.2.2.	Según la distribución de la captación.....	74
6.2.3.	Según la ubicación del evaporador.....	75
6.2.4.	Según la energía de compresión.....	75
6.3.	Descripción de los componentes de la bomba de calor.....	75
6.3.1.	Introducción.....	75
6.3.2.	Compresor	76
6.3.3.	Condensador	76
6.3.4.	Válvula de expansión	76
6.3.5.	Evaporador.....	76
6.3.6.	Instrumentación y control	76
6.3.7.	Otros componentes.....	77
6.4.	Fundamentos físicos de la bomba de calor	77
6.4.1.	Introducción.....	77
6.4.2.	Parámetros de operación ideales	78
6.4.3.	Parámetros de operación teóricos.....	79
6.4.4.	Parámetros de operación reales	80
6.4.5.	Parámetros de operación globales	81
6.4.6.	Parámetros de operación medios estacionales.....	81

6.4.7.	Reversibilidad de la bomba de calor	82
6.5.	Selección de la bomba de calor	82
6.5.1.	Cumplimiento del dimensionado de ACS	85
6.5.2.	Horario de funcionamiento.....	85
6.5.3.	Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor	86
6.5.4.	Elección del fluido refrigerante y cálculo del TEWI de la instalación....	88
CAPÍTULO VII: SISTEMA DE CAPTACIÓN.....		91
7.1.	Introducción.....	91
7.2.	Descripción del sistema de captación.....	91
7.2.1.	Configuración	92
7.2.2.	Materiales.....	92
7.2.3.	Clima y suelo	95
7.2.4.	Pérdidas de carga	96
7.2.5.	Resultados.....	97
CAPÍTULO VIII: ESTUDIO ECONÓMICO Y AMBIENTAL		101
8.1.	Presupuesto	101
8.2.	Estudio económico.....	104
8.2.1.	Costes de los combustibles.....	104
8.2.2.	Costes de los sistemas	105
8.2.3.	Comparativa de costes	109
8.2.4.	Estudio de amortizaciones	111
8.3.	Estudio ambiental	117
CONCLUSIONES		119
BIBLIOGRAFÍA.....		121
Libros		121
Proyectos Fin de Carrera		123
Sitios Web.....		124
Software utilizado		125

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1: Esquema de principio de la instalación.....	2
---	---

CAPÍTULO II

Figura 2.1: Variación de la temperatura de la Tierra según la profundidad	10
Figura 2.2: Evolución de la temperatura según la profundidad.....	10
Figura 2.3: Representación esquemática de un Sistema Geotérmico Estimulado	12
Figura 2.4: La radiación solar y las condiciones climáticas influyen sobre la temperatura del subsuelo sólo hasta cierta profundidad	14
Figura 2.5: Evolución de la temperatura del suelo	14
Figura 2.6: Principales usos de la energía geotérmica en función de la temperatura	15
Figura 2.7: Sistema con perforación vertical	18
Figura 2.8: Representación de un sistema con captación horizontal	19
Figura 2.9: Representación de una vivienda con pilotes energéticos.....	21

CAPÍTULO III

Figura 3.1: Distribución de la Planta 0	24
Figura 3.2: Distribución de la Planta 1	24
Figura 3.3: Distribución de la Planta 2	25
Figura 3.4: Vista de la vivienda en 3D	25
Figura 3.5: Orientación de las fachadas.....	26
Figura 3.6: Mapa hidrogeológico de Valladolid	28

CAPÍTULO IV

Figura 4.1: Esquema de la envolvente térmica de una vivienda	36
Figura 4.2: Pantalla inicial de CalculoAire	46

CAPÍTULO V

Figura 5.1: Vista transversal del suelo radiante	58
Figura 5.2: Perfiles de temperatura para distintos sistemas de calefacción	60
Figura 5.3: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 0.....	70
Figura 5.4: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 1.....	70
Figura 5.5: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 2.....	71

CAPÍTULO VI

Figura 6.1: Componentes de una bomba de calor geotérmica	75
Figura 6.2: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica.....	77
Figura 6.3: Máquina de refrigeración ideal de Carnot.....	78
Figura 6.4: Bomba de calor y diagrama T - s teórico.....	79
Figura 6.5: Diagrama p-h teórico y real de una bomba de calor.....	80
Figura 6.6: Reversibilidad de la bomba de calor por medio de una válvula de cuatro vías	82
Figura 6.7: Bomba de calor ECOGEO C3 3-12 kW	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO I

Gráfico 1.1: Evolución temporal de la frecuencia de desastres naturales en el mundo	4
Gráfico 1.2: Capacidad instalada para usos directos (año 2010).....	6
Gráfico 1.3: Escenario mundial usos térmicos de energía geotérmica	7
Gráfico 1.4: Escenario Europeo de energía geotérmica de uso directo	7
Gráfico 1.5: Evolución temporal de la Energía Geotérmica en España.....	8

CAPÍTULO V

Gráfico 5.1: Cálculo del paso entre tubos.....	62
--	----

CAPÍTULO VIII

Gráfico 8.1: Comparativa de la inversión inicial entre los sistemas	110
Gráfico 8.2: Comparativa del consumo anual de energía entre los sistemas	110
Gráfico 8.3: Comparativa del coste anual de energía entre los sistemas.....	111
Gráfico 8.4: Evolución del VAN - BCG vs. Gas Natural	113
Gráfico 8.5: Evolución del VAN - BCG vs. Gasóleo.....	114
Gráfico 8.6: Evolución del VAN - BCG vs. Propano	115
Gráfico 8.7: Evolución del VAN - BCG vs. BC Aerotérmica	116
Gráfico 8.8: Comparativa de emisiones anuales de CO ₂ entre los sistemas	118

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO III

Tabla 3.1: Superficies de los recintos	23
Tabla 3.2: Valores climáticos normales en Valladolid.....	27
Tabla 3.3: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos materiales	29

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1: Condiciones de diseño del interior en una vivienda.....	31
Tabla 4.2: Porcentaje de huecos en cada fachada de la vivienda	32
Tabla 4.3: Zonas climáticas de la Península Ibérica.....	33
Tabla 4.4: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en W/m ² K	34
Tabla 4.5: Valores límites de los parámetros característicos medios	35
Tabla 4.6: Características del muro exterior.....	36
Tabla 4.7: Características del tabique interior	37
Tabla 4.8: Características del forjado interior	37
Tabla 4.9: Características del suelo	38
Tabla 4.10: Características de la cubierta.....	38
Tabla 4.11: Factor Solar del hueco. Retranqueo	40
Tabla 4.12: Factor Solar.....	41
Tabla 4.13: Cargas térmicas en la Bodega.....	49
Tabla 4.14: Cargas térmicas en el Cuarto de Juegos	49

Tabla 4.15: Cargas térmicas en el W.C. 0	49
Tabla 4.16: Cargas térmicas en el Distribuidor 0	50
Tabla 4.17: Cargas térmicas en el Salón	50
Tabla 4.18: Cargas térmicas en la Cocina	50
Tabla 4.19: Cargas térmicas en el Hall	51
Tabla 4.20: Cargas térmicas en el W.C.1	51
Tabla 4.21: Cargas térmicas en el Distribuidor 1	51
Tabla 4.22: Cargas térmicas en el Dormitorio 3	52
Tabla 4.23: Cargas térmicas en el Dormitorio 1	52
Tabla 4.24: Cargas térmicas en el Dormitorio 2	52
Tabla 4.25: Cargas térmicas en el Dormitorio Principal	53
Tabla 4.26: Cargas térmicas en el Despacho	53
Tabla 4.27: Cargas térmicas en el W.C. Principal	53
Tabla 4.28: Cargas térmicas en el W.C. 2	54
Tabla 4.29: Cargas térmicas en el Distribuidor 2	54
Tabla 4.30: Cargas térmicas totales en la vivienda	54
Tabla 4.31: Resumen cargas térmicas de cada local de la vivienda	55

CAPÍTULO V

Tabla 5.1: Temperaturas de impulsión y caudal total	64
Tabla 5.2: Características del circuito de la bodega.	64
Tabla 5.3: Características del circuito del cuarto de juegos	65
Tabla 5.4: Características del circuito del W.C. 0	65
Tabla 5.5: Características del circuito del distribuidor 0	65
Tabla 5.6: Características del circuito de la cocina	65
Tabla 5.7: Características del circuito 1 del salón	66
Tabla 5.8: Características del circuito 2 del salón	66
Tabla 5.9: Características del circuito del hall	66
Tabla 5.10: Características del circuito del dormitorio 3	66
Tabla 5.11: Características del circuito del W.C. 1	67
Tabla 5.12: Características del circuito del distribuidor 1	67
Tabla 5.13: Características del circuito del dormitorio 1	67
Tabla 5.14: Características del circuito del dormitorio 2	67
Tabla 5.15: Características del circuito 1 del dormitorio principal	68
Tabla 5.16: Características del circuito 2 del dormitorio principal	68
Tabla 5.17: Características del circuito del W.C. principal.	68
Tabla 5.18: Características del circuito del W.C. 2	68
Tabla 5.19: Características del circuito 1 del despacho	69
Tabla 5.20: Características del circuito 2 del despacho	69
Tabla 5.21: Características del circuito del distribuidor 2	69

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1: Características técnicas de la bomba de calor geotérmica ECOGEO C3 3-12 kW	84
Tabla 6.2: Demanda de ACS	85
Tabla 6.3: Características del R-410a	89

CAPÍTULO VII

<i>Tabla 7.1: Características termofísicas del agua glicolada (30,5%)</i>	96
---	----

CAPÍTULO VIII

<i>Tabla 8.1: Costes de los tubos y materiales aislantes del sistema de distribución.</i>	101
<i>Tabla 8.2: Costes de los accesorios y dispositivos de regulación y control del sistema de distribución</i>	102
<i>Tabla 8.3: Costes de los colectores y sus accesorios del sistema de distribución..</i>	102
<i>Tabla 8.4: Coste de la bomba de calor geotérmica</i>	102
<i>Tabla 8.5: Costes de los tubos, el agua glicolada y los accesorios del sistema de captación</i>	103
<i>Tabla 8.6: Costes de las perforaciones del sistema de captación</i>	103
<i>Tabla 8.7: Resumen del presupuesto total</i>	103
<i>Tabla 8.8: Precios de los combustibles</i>	104
<i>Tabla 8.9: Aporte, consumo y coste anual de la energía por la Instalación Total de Gas Natural</i>	105
<i>Tabla 8.10: Coste Instalación Global de Gas Natural</i>	105
<i>Tabla 8.11: Aporte, consumo y coste anual de la energía por la Instalación Total de Gasóleo</i>	106
<i>Tabla 8.12: Coste Instalación Global de Gasóleo</i>	106
<i>Tabla 8.13: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Total de Propano.</i>	107
<i>Tabla 8.14: Coste Instalación Global de Propano.</i>	107
<i>Tabla 8.15: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Total con BC Aerotérmica</i>	108
<i>Tabla 8.16: Coste Instalación con BC Aerotérmica</i>	108
<i>Tabla 8.17: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Geotérmica</i>	109
<i>Tabla 8.18: Coste Instalación Geotérmica</i>	109
<i>Tabla 8.19: VAN – BCG vs. Gas Natural (1)</i>	113
<i>Tabla 8.20: VAN – BCG vs. Gas Natural (2)</i>	113
<i>Tabla 8.21: VAN – BCG vs. Gasóleo (1)</i>	114
<i>Tabla 8.22: VAN – BCG vs. Gasóleo (2)</i>	114
<i>Tabla 8.23: VAN – BCG vs. Propano (1)</i>	115
<i>Tabla 8.24: VAN – BCG vs. Propano (2)</i>	115
<i>Tabla 8.25: VAN – BCG vs. BC Aerotérmica (1)</i>	116
<i>Tabla 8.26: VAN – BCG vs. BC Aerotérmica (2)</i>	116
<i>Tabla 8.27: Emisiones CO₂ según tipo de combustible</i>	117
<i>Tabla 8.28: Consumo de energía y emisiones anuales de CO₂ de los sistemas</i>	117

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Resumen del trabajo presentado

Este Trabajo Fin de Grado presenta el estudio de la posibilidad de utilizar una bomba de calor geotérmica para la producción de ACS, calefacción y refrigeración por suelo radiante/refrescante instalada en una vivienda unifamiliar en Covaresa, Valladolid.

En este documento se calculan las cargas térmicas y se describe la instalación requerida para cubrir la demanda energética. Se ha de añadir que se cumple en todo momento la legislación vigente en el campo a aplicar.

La instalación de geotermia se dimensiona a partir de las cargas térmicas calculadas. Estas son halladas a partir de las características de la vivienda (cerramientos, orientación, superficies...), condiciones exteriores e interiores, actividad realizada en el local, habitantes, etc. Se obtiene una potencia necesaria para calefacción de 8,84 kW y 9,08 kW para refrigeración.

El sistema de distribución de suelo radiante/refrescante se compone por un entramado de tubos por los que circula un fluido caloportante, en este caso agua caliente.

La bomba de calor geotérmica, basada en un sistema suelo/agua, cuenta con una potencia suficiente para lograr cubrir las demandas energéticas de la vivienda. Se dispone de tal forma que ajusta los consumos de energía a las variaciones de las cargas y funciona con una curva de calor en función de la temperatura exterior. Además, esta incluye un acumulador de ACS de 170 litros con una capacidad de producción de forma rápida y a un bajo coste económico.

El sistema de captación tiene una disposición vertical y en circuito cerrado por el que transitará agua con una concentración de glicol del 30,5%. La longitud total de la perforación es de 363 metros que se dividen en tres perforaciones, separadas siete metros entre ellas, con una longitud de sonda para cada bucle de 121 metros. Al alcanzar esas profundidades se consigue no depender de las condiciones ambientales exteriores lo que se traduce en altos rendimientos energéticos.

A continuación, en la *Figura 1.1*, se muestra el esquema de principio de la instalación.

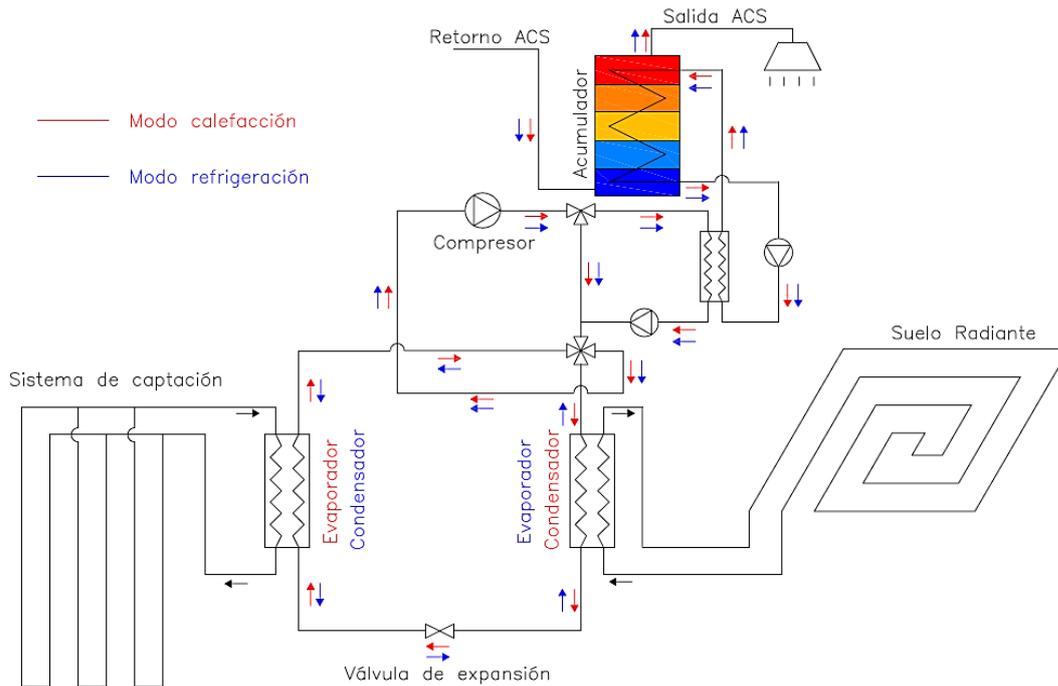


Figura 1.1: Esquema de principio de la instalación.

1.2. Objetivos del proyecto

El objeto de este Trabajo Fin de Grado es el dimensionado de una instalación geotérmica en una vivienda unifamiliar. Para alcanzar el objetivo principal se plantean los siguientes subobjetivos:

- Descripción general de la energía geotérmica.
- Calcular las necesidades energéticas de la vivienda tanto para calefacción como para refrigeración.
- Evaluar los elementos requeridos en el sistema de distribución de calor en la vivienda.
- Detallar los parámetros fundamentales de una bomba de calor geotérmica y seleccionar una acorde a las cargas térmicas de la casa.
- Dimensionar y estimar los elementos necesarios en el sistema de captación.
- Realizar un estudio económico de la instalación geotérmica enfrentándola con otros sistemas convencionales.
- Analizar el tiempo requerido para amortizar dicha instalación geotérmica en contraste con los sistemas convencionales.
- Examinar y comparar las emisiones de CO₂ que producen tanto la instalación de geotermia como los sistemas convencionales.

1.3. Antecedentes

La búsqueda de mayor confort y bienestar de la población ha propiciado el desarrollo de tecnologías que sean capaces de afrontar los requerimientos energéticos en las viviendas. Las necesidades de calefacción y refrigeración constituyen la mayor parte del consumo de energía en los sectores residencial y servicios, llegando a representar en la Unión Europea el 36% de la energía final [1].

Una forma de lograrlo es intentar disminuir la dependencia de las fuentes de energías fósiles, contaminantes y percederas, y empezar a sustituirlas por fuentes alternativas, no contaminantes y perdurables que el planeta nos ofrece.

El uso de estas energías alternativas se conoce como energías renovables. En este trabajo se va a tratar concretamente de la Energía Geotérmica, que consiste en el aprovechamiento de la energía en forma de calor que se encuentra en el interior de la Tierra, debido a que a una determinada profundidad la temperatura del subsuelo se mantiene constante ajena a lo que ocurra en el exterior.

Por otra parte, la Eficiencia Energética, es otra estrategia de la UE, que busca disminuir el consumo de energía, manteniendo el confort y calidad de vida, protegiendo el medio ambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso, mediante la utilización de equipos más eficientes como es el caso de la bomba de calor, que se utiliza en las instalaciones de geotermia.

Se ha creído conveniente analizar en este Trabajo Fin de Grado la instalación geotérmica en una vivienda unifamiliar, comparando la eficiencia energética de ésta frente otras instalaciones con un sistema convencional. También se va a estudiar los costes de todas las instalaciones y se verá si es amortizable la instalación geotérmica o no. Además se evaluará la emisión de CO₂ a la atmósfera que produce cada sistema.

El motivo de este Trabajo Fin de Grado se debe a que siempre me he sentido atraído por el sector energético. Por otra parte, las prácticas realizadas en Cenit Solar, empresa dedicada a las energías renovables, me ha despertado un especial interés hacia estas.

1.4. Justificación

Actualmente, la obtención de energía se basa en la utilización de fuentes fósiles como el gas, el carbón y el petróleo o energías intermedias derivadas de las anteriores, como los combustibles empleados en el transporte y la electricidad.

El uso de dichos combustibles está siendo reconsiderado debido a que: su utilización masiva está causando efectos perjudiciales en el medio ambiente y en los seres vivos, se trata de recursos agotables que están situados en lugares específicos del mundo, y, debido a su gran uso, se están agotando estas reservas naturales complicando el futuro de las nuevas generaciones.

Cada vez hay más conciencia social para preservar el medio ambiente debido al gran número de investigaciones que han constatado la existencia del cambio climático. Por ejemplo, la temperatura media de la Tierra ha aumentado en el último siglo un $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ [2]. Por otro lado, se estima que se han perdido 226 Gt de hielo al año de media durante los años 1971-2009 y 275 Gt de hielo al año en el periodo 1993-2009 [3]. Asimismo, se ha producido un incremento de la frecuencia e intensidad de los desastres naturales como se expone en el *Gráfico 1.1*.

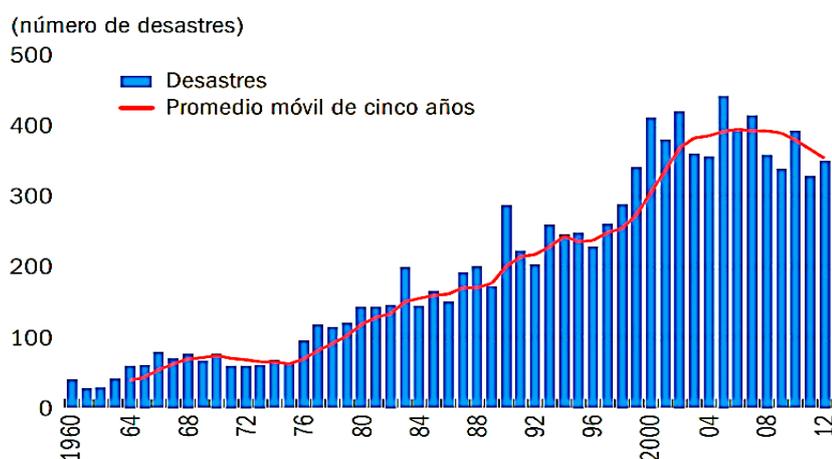


Gráfico 1.1: Evolución temporal de la frecuencia de desastres naturales en el mundo. [WB1]

Compromisos Políticos Internacionales

Debido a la alta dependencia energética de la Unión Europea, concretamente un 53,3% en el 2012 según [WB2], se han propuesto incrementar gradualmente el grado de autoabastecimiento energético. Esto será viable mediante la inserción continua de energías renovables, ilimitadas y sostenibles.

La dependencia energética en España es incluso superior, según [WB2] se trata de un 73,3% en el 2012. Por ello se debe involucrar aún más en este ámbito a partir de la conversión del sistema energético actual hacia uno más innovador, en el cual las energías renovables cobren mayor importancia a medio y largo plazo [4].

Otro objetivo político marcado, tanto por España como por la UE, es el tomar medidas correctoras contra el cambio climático.

Para alcanzar los objetivos anteriores, durante los últimos años, se han pactado un conjunto de tratados y compromisos políticos internacionales, entre los que se encuentran [2]:

- Cumbre de las Naciones Unidas de Río de Janeiro (1992).
- Carta de Aalborg (1994).
- Carta de Lisboa (1996).
- Protocolo de Kyoto.
- La carta de la Tierra (2000).
- Declaración del Milenio (2000).
- Cumbre de las Naciones Unidas de Johannesburgo (2002).
- Convenio de Aarhus (2005).
- Tratado de Lisboa (2007)
- Plan de Acción de la Conferencia de Bonn sobre Energías Renovables de junio de 2009.
- Objetivos 20-20-20.

Algunos de estos convenios ya vencieron como el Protocolo de Kyoto que caducó en el 2012. Para poder seguir avanzando en el tema medioambiental han aparecido otros como la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de Bali 2007 (COP 13), en la cual se busca aminorar las emisiones, o la Cumbre de Copenhague 2010 (COP 15), cuyo objetivo se basa en continuar avanzando en el control del cambio climático. Otro compromiso internacional es el Tratado de Lisboa del 2007, el cual insta a la energía como la piedra angular de la estrategia europea [5].

Se estima que del total de gases de efecto invernadero emitidos por la Unión Europea, el 80% proviene de la energía. Por ello, el Consejo Europeo se ha propuesto una serie de propósitos para el año 2020, son los denominados objetivos 20-20-20. Se resumen en: que el consumo energético sea un 20% inferior en el 2020, disminuir al menos un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero de 2020 respecto a las de 1990, pudiendo alcanzar el 30%, y que del consumo energético de la Unión Europea en 2020, un 20% sea procedente de fuentes renovables [6].

Además, la Directiva de 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, establece que el 10% del uso de energía en el sector transporte provenga de energías renovables en el 2020.

Dicha Directiva fijó que cada Estado miembro debe elaborar un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) destinado a los años 2011-2020 para alcanzar los objetivos antes mencionados [7].

Por otro lado, el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, estableció la creación de un Plan de Energías Renovables para el período 2011-2020 (PER 2011-2020).

El Plan de Energías Renovables 2011-2020, contiene las características principales del PANER. Además, se incluyen análisis a mayores no tratados en este, por ejemplo, las perspectivas de la evolución tecnológica y la evolución esperada de costes [4]. La energía geotérmica es una de las consideradas en dicho plan y que además es el tema de este Trabajo Fin de Grado.

Evolución de la energía geotérmica

La energía geotérmica ha evolucionado tanto en el uso eléctrico como en el térmico. Sin embargo, al tratarse este trabajo de la climatización de una vivienda, sólo se presenta el desarrollo en el uso térmico.

La energía geotérmica se puede utilizar habitualmente como aplicación directa de calor: calefacción, balnearios, invernaderos, acuicultura. Uno de los usos más comunes es mediante bombas de calor geotérmicas, como se puede ver en el *Gráfico 1.2* [4].

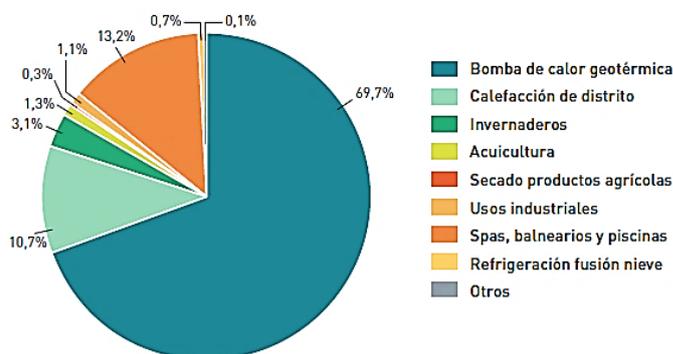


Gráfico 1.2: Capacidad instalada para usos directos (año 2010). [WB3]

Se estima que, de 2005 a 2009, la energía geotérmica mundial para usos térmicos ha aumentado un 60,2%, logrando 121.696 GWh/año. Además, durante el mismo período, la capacidad instalada mundial ha crecido un

78,9% alcanzando 50.583 MWt. Estos resultados conllevan a un ahorro de 307,8 millones de barriles de petróleo al año, consiguiendo reducir así 148,2 millones de toneladas de CO₂ [4].

En el *Gráfico 1.3*, se puede observar la evolución de la utilización de la energía geotérmica como fuente térmica en los países más desarrollados del mundo en este campo.

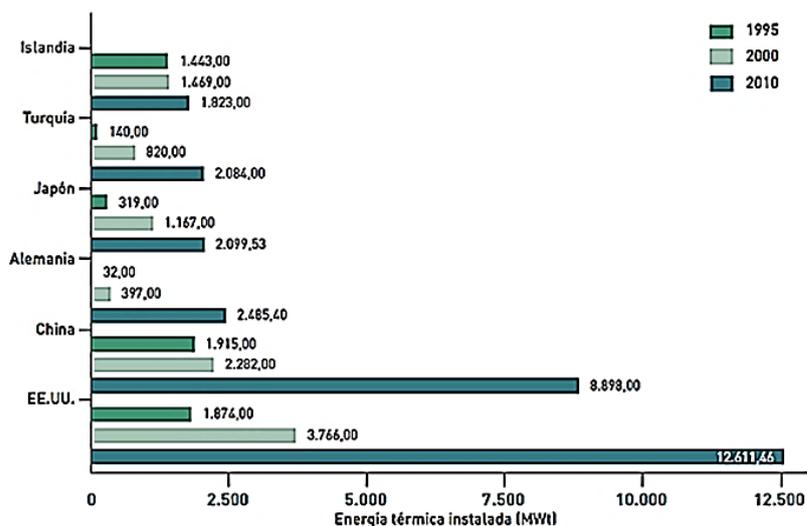


Gráfico 1.3: Escenario mundial usos térmicos de energía geotérmica. [WB4]

A nivel mundial, en 2010, la potencia instalada para district heating fue de 5.391 MWt con 62.984 TJ/año de energía utilizada. Esto supone un incremento de 24% y 14% respectivamente en comparación a 2005.

En Europa, se espera llegar a tener una potencia instalada de 80.000 MW en el año 2030 [4]. El *Gráfico 1.4* muestra la evolución la energía geotérmica en los países más desarrollados en este ámbito.

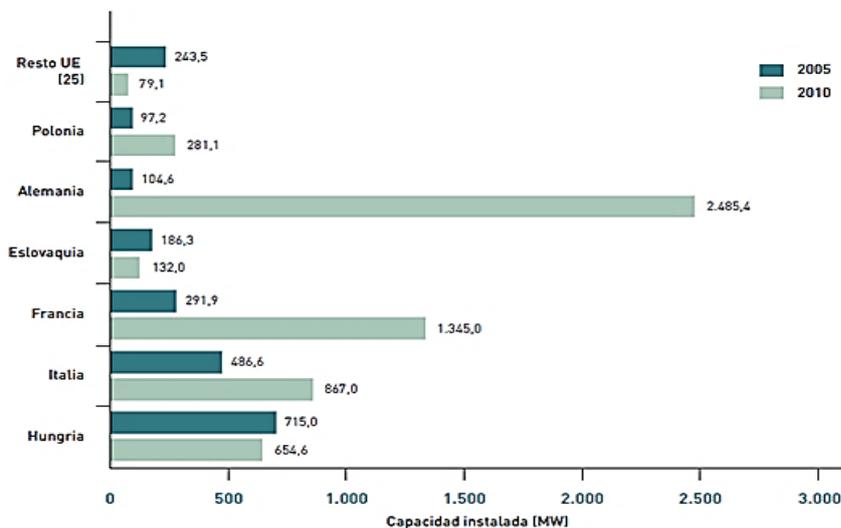


Gráfico 1.4: Escenario Europeo de energía geotérmica de uso directo. [WB4]

En España, se pueden distinguir dos formas de aprovechar la energía geotérmica [7]:

- Energía geotérmica de baja temperatura.

Actualmente ésta se utiliza en aplicaciones directas del calor, fundamentalmente en invernaderos y balnearios. No se estima un gran crecimiento en los próximos años, no obstante, sí que se prevé un aumento a partir del 2015 mediante la instalación de redes de climatización, conocidas como district heating.

- Energía geotérmica de muy baja entalpía mediante el uso bombas de calor geotérmicas.

Antiguamente la aplicación de la bomba de calor en sistemas abiertos era muy común, sin embargo, el uso de ésta en sistemas cerrados cada vez es más frecuente en España desde el año 2000. Se estima que la potencia instalada de energía geotérmica en España supera los 100 MWt.

El número de instalaciones geotérmicas basadas en bombas de calor ha crecido un 30% en los últimos años. Además se estima que aumentará en un 67,2% para 2020 [8]. En el *Gráfico 1.5*, se muestra la evolución de la energía geotérmica, con y sin bomba de calor, en España entre los años 2005-2020.

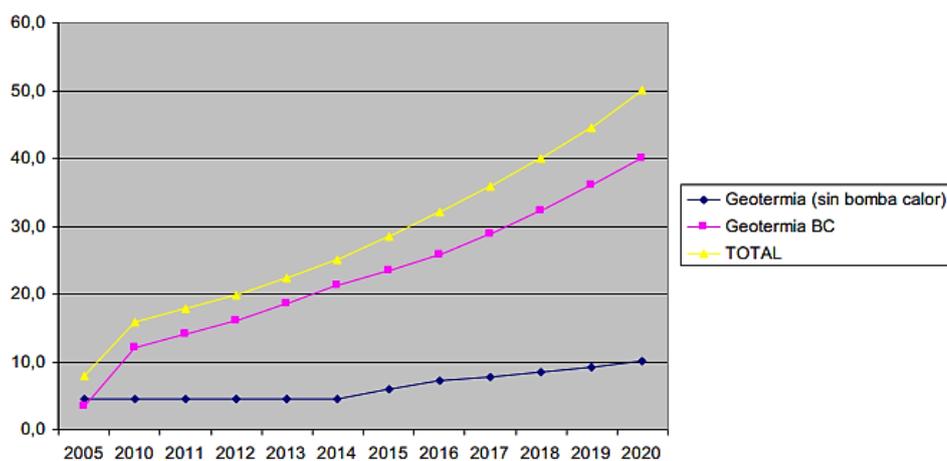


Gráfico 1.5: Evolución temporal de la Energía Geotérmica en España. [7]

CAPÍTULO II: LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

2.1. Definición de la Energía Geotérmica

La energía geotérmica, se define, según la VDI 4640 de Alemania [9], como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Incluye el calor que se conserva en rocas, suelos y aguas subterráneas, independientemente de cuál sea su temperatura, profundidad y origen. No engloba los calores comprendidos en masas de agua superficiales, continentales o marinas.

La palabra geotérmica hace referencia tanto a la ciencia que se encarga de evaluar los fenómenos térmicos que ocurren en el interior de la Tierra como a todos los mecanismos industriales que tratan de aprovechar ese calor para generar energía.

Dentro de las energías renovables, la energía geotérmica es una de las menos conocidas. La palabra geotermia viene del latín, “geo” que significa “tierra” y “termia” que significa “calor”. Por lo tanto, la energía geotérmica es el calor de la tierra.

2.2. Gradiente térmico

La Tierra, por dentro, se encuentra muy caliente y según se avanza hacia su interior, las temperaturas van aumentando. La profundidad alcanzada en determinados puntos de la superficie terrestre es reducida, apenas unos cuantos kilómetros. Por ello, el interior de la Tierra sólo lo podemos deducir a partir de medidas indirectas [2].

En la Tierra, se pueden distinguir tres capas principales en función de la profundidad y temperatura a la que se encuentran [10]:

- **El núcleo**, es el centro de la Tierra. Puede llegar a una temperatura de 4.200 °C. Es sólido en el interior y líquido en la periferia.
- **El manto**, alcanza una temperatura comprendida en el intervalo de 1.000 °C a 3.000 °C. Se solidifica según se avanza hacia su parte más externa.
- **La corteza**, alcanza una temperatura de unos 1.000 °C en la zona en contacto con el manto. En su capa más externa la temperatura es de 15 - 20 °C.

En la *Figura 2.1*, se muestra cómo progresa la temperatura de la Tierra según se va aumentando la profundidad.

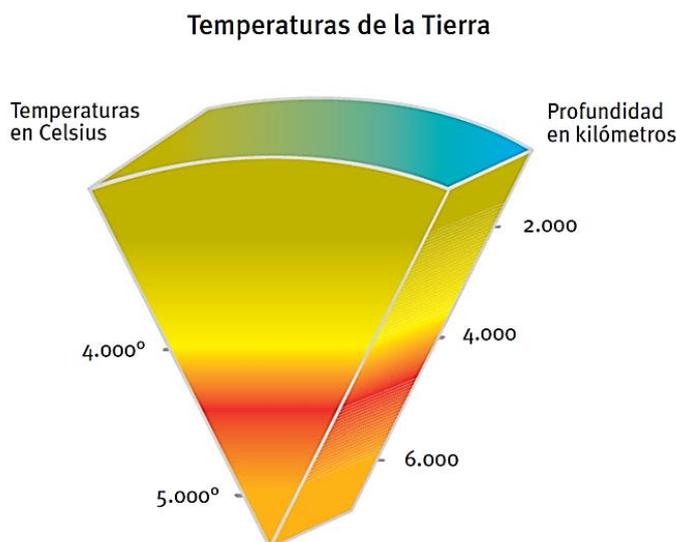


Figura 2.1: Variación de la temperatura de la Tierra según la profundidad. [WB4]

Aproximadamente el 99% del total de la masa del planeta tiene una temperatura mayor que 1.000°C . Sin embargo, tan sólo un 0,1% de la masa de la Tierra está a menos de 100°C .

Se define como gradiente térmico (g), expresado en $^{\circ}\text{C}/\text{km}$, al incremento de temperatura percibido por el subsuelo al profundizar desde la superficie de la corteza hacia las partes más interiores del planeta.

Se considera como gradiente térmico normal a aquel que tiene unos valores aproximados a $25\text{--}30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Sin embargo, existen zonas del planeta en las cuales el gradiente térmico es más elevado que este. De esta forma, se estima que el gradiente térmico medio en la Tierra es del orden a $33^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Estos gradientes térmicos se muestran en la *Figura 2.2*, en la cual se puede observar cómo evoluciona la temperatura según aumenta la profundidad [2].

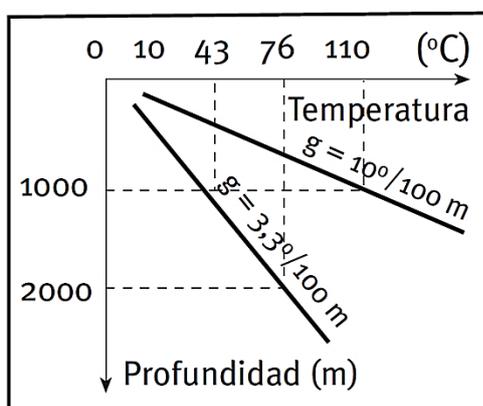


Figura 2.2: Evolución de la temperatura según la profundidad. [WB4]

A partir de sondeos mineros o petrolíferos y contando con sondas térmicas, se puede conseguir de forma sencilla la medida del gradiente geotérmico. El flujo de calor es más complicado de medir. Este simboliza la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie expresado en mW/m^2 .

El flujo de calor medio de la Tierra es aproximadamente 60 mW/m², pudiendo llegar a centenas o millares en lugares específicos.

Debido a las altas desigualdades en las temperaturas del interior y de la superficie del planeta, se estima que la energía que llega a la superficie de la Tierra es del orden de $4,2 \times 10^{12}$ J por segundo, de la cual el ser humano es capaz de aprovechar un pequeño porcentaje [10].

2.3. Recursos y yacimientos geotérmicos

Los recursos geotérmicos representan una parte de energía o acumulación de calor situada en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su aprovechamiento es económica y potencialmente viable.

Se habla de yacimiento geotérmico cuando en una zona de la superficie terrestre se cumplen una serie de circunstancias geológicas y geotérmicas propicias que permiten aprovechar económicamente los recursos geotérmicos del subsuelo.

Para que se presente un yacimiento geotérmico se deben dar las siguientes condiciones [2]:

- Existencia de un foco de calor activo.
- Existencia de un material permeable con su base impermeable, conocido como almacén geotérmico, por el que circula un fluido, generalmente agua de origen meteórica en fase de vapor o líquido.
- Existencia de un sello o cobertera que imposibilite, o por lo menos restrinja, la salida del fluido.

Con respecto a los tipos de recursos geotérmicos, su clasificación está fundamentada en la temperatura³.

- Recursos de muy baja temperatura: inferior a 30°C.
- Recursos de baja temperatura: entre 30 y 90°C.
- Recursos de media temperatura: entre 90 y 150°C.
- Recursos de alta temperatura: superior a 150°C.

2.4. Clasificación de los yacimientos geotérmicos

En cuanto a la clasificación de los yacimientos geotérmicos convencionales, estos se establecen en función de los niveles energéticos de los recursos que contienen. Por este motivo, dependiendo de la clase de recursos que se esté tratando, tendrán unas condiciones u otras [10].

2.4.1. Yacimientos de alta entalpía

Se refieren a aquellos en los que el fluido se haya a grandes presiones y temperaturas (superior a 150°C, incluso a 300°C). Debido a las propiedades termodinámicas del fluido se puede usar para producir electricidad.

Estos yacimientos se localizan en áreas de la Tierra con un gradiente geotérmico excepcionalmente elevado. En dichas áreas normalmente se dan fenómenos geológicos extremos. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1,5 y 3 kilómetros.

La producción de energía eléctrica se basa en aprovechar el agua subterránea cuando remonta hacia la superficie, de tal forma que la presión se reduce duramente generando mucho vapor. Posteriormente, este vapor es separado mediante un separador de fases. Finalmente, se hace pasar a través de una turbina, la cuál será la encargada de producir la electricidad.

Se pueden añadir dos singularidades a estos yacimientos:

Yacimientos de roca seca caliente

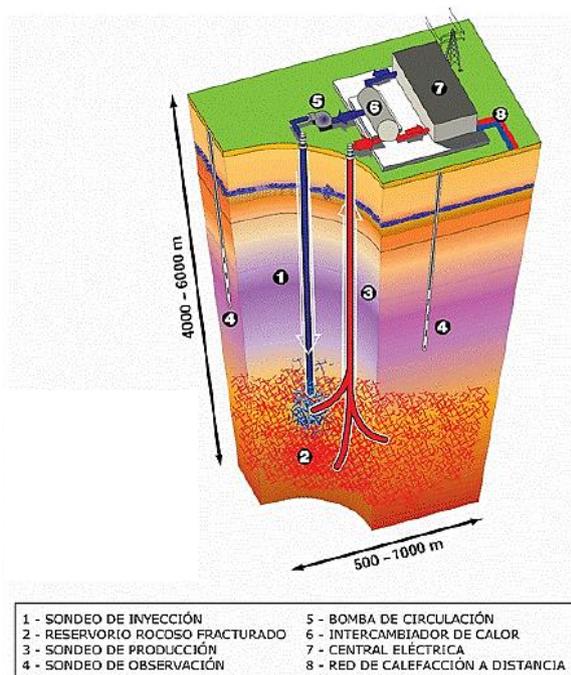


Figura 2.3: Representación esquemática de un Sistema Geotérmico Estimulado. [10]

Son aquellos en los cuales hay presencia de materiales de escasa permeabilidad y porosidad que se encuentran a grandes temperaturas y bajas profundidades.

El sistema utilizado se fundamenta en inyectar gran cantidad de agua a alta presión por medio de un pozo en la roca caliente. De esta forma, se logra crear una red de fracturas que originan un “almacén artificial”. Consiguiendo, por lo tanto, una permeabilidad artificial de las rocas.

A este proceso se le denomina hidrofracturación o fracturación hidráulica. El fin a alcanzar es producir un intercambio de calor a partir del fluido inyectado, de tal forma que al regresar tenga mayor temperatura.

Estas tecnologías son las denominadas Sistemas Geotérmicos Estimulados o EGS, cuyo esquema se representa en la *Figura 2.3*, los cuales reciben este nombre debido a que se necesita la actuación directa del hombre para poder crear el yacimiento.

Yacimientos geopresurizados

La característica de estos consiste en que la presión hidrostática se encuentra entre un 40 y un 90% superior en comparación con la presión que debería haber en otro yacimiento a la misma profundidad. Estos yacimientos no pueden ser explotados si se encuentran a una profundidad de más de 6 kilómetros y temperaturas superiores a 150°C.

2.4.2. Yacimientos de media entalpía

Se encuentran a temperaturas entre 100 y 150°C. Esto hace posible que se pueda producir electricidad a partir de ciclos binarios. En estos yacimientos, el agua puede ascender de forma sencilla hasta la superficie.

Se diferencia con el de alta entalpía en que la capa impermeable sobre el acuífero, que conserva el calor y la presión, es inexistente en este caso.

2.4.3. Yacimientos de baja entalpía

La temperatura, en este caso, está entre los 30 y los 90°C. Su aplicación son los usos directos del calor.

Para aprovechar estos yacimientos, se requiere poder circular el fluido por las rocas, pudiendo de este modo aprovechar el calor contenido en ellas.

2.4.4. Yacimientos de muy baja entalpía

Son aquellos en los que el foco de calor se haya a temperaturas inferiores a los 30°C. Su localización es muy extensa, ya que cualquier punto de la superficie terrestre puede ser usado para absorber el calor que se encuentra a poca profundidad del subsuelo.

A muy poca profundidad del suelo se produce una fluctuación en la temperatura debido al intercambio de calor entre la superficie del suelo y la atmósfera. La temperatura a pocos metros de profundidad de la superficie del suelo se mantiene estable, entre 7 y 13°C [10]. Esto se debe a que el suelo actúa como una masa térmica que absorbe el calor que proviene del Sol.

La *Figura 2.4*, muestra que tanto la radiación solar como las condiciones climáticas donde se ubique la instalación, influyen en la temperatura del subsuelo hasta una profundidad inferior a los 15 metros.

Se han realizado investigaciones sobre las fluctuaciones de la temperatura del subsuelo a lo largo del año. A un metro de profundidad, las variaciones se aproximan a los 10°C, y a medida que se profundiza, estas variaciones disminuyen, llegando a ser despreciables antes de llegar a los 10 metros.

Una vez sobrepasado los 10 metros de profundidad y habiendo poca circulación de agua caliente, el suelo puede guardar el calor recibido y conservarlo a lo largo de las estaciones, pudiendo estar a una temperatura prácticamente permanente a lo largo del año.

Este valor de temperatura almacenada en el suelo depende de varios factores: de la flora, de la meteorología, de la cubierta del suelo, de la cantidad de nieve, de su pendiente y de las características del terreno.

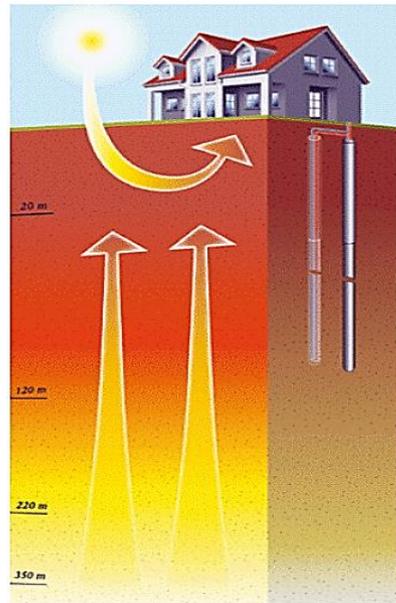


Figura 2.4: La radiación solar y las condiciones climáticas influyen sobre la temperatura del subsuelo sólo hasta cierta profundidad. [10]

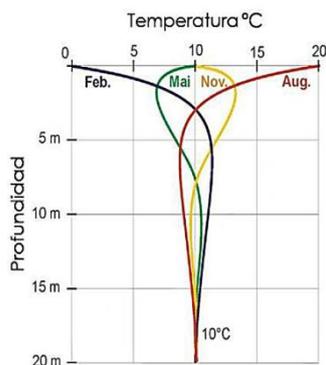


Figura 2.5: Evolución de la temperatura del suelo. [WB4]

Como se ve en la *Figura 2.5*, sobrepasado los 15 metros de profundidad, la temperatura del suelo es ajena al exterior, dejando de depender de las variaciones de la temperatura en las diferentes estaciones y del clima. Dicha temperatura dependerá sólo de las características geológicas y geotérmicas.

Esto hace pensar que el calor absorbido por el subsuelo se debe al flujo de calor procedente del núcleo de la Tierra.

Por lo tanto, en los yacimientos geotérmicos de muy baja entalpía, se hace pasar, por medio de una tubería en circuito cerrado, un fluido (agua con refrigerante) que hace posible el aprovechamiento del calor de las rocas presentes a poca profundidad de la superficie terrestre.

Existen diferentes esquemas fundamentados en: bucles horizontales instalados a pocos metros de profundidad, en sondeos verticales con pozos de extracción, en los cimientos verticales de edificación, en las losas de cimentación, etc [2].

Una buena opción de utilizar las técnicas basadas en el uso de recursos geotérmicos de muy baja entalpía es mediante una instalación reversible. De tal forma que se consiga extraer calor de la vivienda en los meses calurosos y aportar calor en los meses fríos mediante una única instalación. De esta manera, el subsuelo se calienta en verano y se enfría en invierno.

2.5. Aplicaciones de la energía geotérmica

Un fluido geotermal puede ser usado en un campo o en otro en función de su entalpía (o contenido en calor).

En el campo de la geotermia, la entalpía se define como la cantidad de energía que un sistema termodinámico, en este caso un fluido, es capaz de intercambiar con su alrededor. Se expresa en kcal/kg o en kJ/kg [10].

No se puede medir la entalpía de un fluido que se encuentra en el subsuelo debido a la inexistencia de aparatos destinados a ello. No obstante, la temperatura y la entalpía se estiman aproximadamente proporcionales, y como la temperatura sí que se puede medir, se suele trabajar con las temperaturas a las que se encuentran los fluidos en vez de trabajar con sus contenidos en calor.

En la *Figura 2.6*, se representan los usos más comunes de la energía geotérmica con sus respectivos intervalos de temperatura de utilización. En su zona inferior se muestra una clasificación de la energía geotérmica, entre determinados rangos de temperatura, en las cuatro principales clases mencionadas anteriormente.



Figura 2.6: Principales usos de la geotermia en función de la temperatura. [10]

Centrándose en los usos térmicos [2]:

2.5.1. Usos térmicos

Desde la antigüedad se ha conocido el uso directo del calor. De esta forma, la energía geotérmica puede ser utilizada para calefacción residencial, acuicultura, balnearios, agricultura y usos industriales. Para el aprovechamiento de recursos de muy baja temperatura se utilizan bombas de calor que permiten calefactar y refrigerar un espacio.

Esta utilización directa de la energía geotérmica se puede clasificar en dos campos: el sector industrial y el sector residencial y de servicios. Como este Trabajo Fin de Grado estudia la climatización de una vivienda unifamiliar se tratará sólo su uso en el sector residencial y de servicios.

Sector residencial y de servicios

La energía geotérmica puede ser utilizada para la climatización en el sector residencial y de servicios. De esta forma posibilita el sustituir los combustibles fósiles considerados excesivamente contaminantes, perjudiciales y caros.

Un sistema de climatización basado en el uso de recursos geotérmicos trabaja adecuadamente con toda clase de instalación de climatización.

Es recomendable que el yacimiento geotérmico de baja o muy baja entalpía se encuentre cercano al lugar que se desea climatizar debido al elevado precio que implican los sistemas encargados de captar el calor contenido en el subsuelo.

A continuación se presentan las aplicaciones más comunes para el uso térmico en el sector residencial y de servicios:

- Doblete de sondeos

Para evitar la pérdida de propiedades del yacimiento se utiliza una técnica conocida como doblete de sondeos. Se trata de un sistema abierto en el cual se distinguen dos tramos. En primer lugar, a partir del sondeo de extracción, se hace pasar el fluido geotérmico, mediante el uso de una bomba, por el intercambiador primario. En éste, el fluido geotérmico cede el calor al intercambiador de tal forma que existe un decremento de temperatura a la salida en comparación con la entrada. Finalmente, el fluido geotérmico es nuevamente inyectado al yacimiento a través del sondeo de inyección.

Usualmente, ambos sondeos se encuentran perforados a pocos metros de distancia en superficie. Por lo tanto, este sistema se resume a dos bocas de pozo y un intercambiador primario.

Sin embargo, a cierta profundidad del subsuelo, por lo menos uno de ellos se desvía. Esto se realiza para que el fluido descargado mediante el sondeo de inyección no afecte al fluido extraído por el sondeo de extracción, debido a que se encuentran a diferentes temperaturas.

A partir de cálculos y programas matemáticos se puede hallar la distancia óptima entre los puntos de inyección y de extracción. Esta es tal que asegura que la variación de temperatura en el punto de extracción sea inferior a 1 °C medido durante período de funcionamiento de la sonda de extracción.

- Calefacción de Distrito o “District Heating”

Debido a la temperatura constante del subsuelo, la energía geotérmica es una de las más recomendadas para aquellas instalaciones que precisen de un consumo energético prácticamente invariable a lo largo de las estaciones.

No obstante, este consumo energético es variable durante el año. Se puede obtener, para cualquier situación geográfica a partir de las temperaturas en cada lugar y la cantidad de horas que se registran estas temperaturas, la curva de potencia térmica o de carga demandada. Esto permite saber en cualquier momento la potencia que se está demandando. De esta forma habrá momentos en los que se requiera mayor o menor potencia.

En el sector doméstico, la curva de demanda de ACS varía mucho si se trata de una sola vivienda. Sin embargo, según se aumenta el número de viviendas de un sistema, la curva de demanda se estabiliza.

El término “District Heating” se refiere a un sistema de calefacción/refrigeración centralizado que permite aprovechar directamente los recursos geotermales. Se basa en el abastecimiento de un conjunto de usuarios, distribuidos dentro de una amplia superficie.

Dispone de un sistema abierto y otro cerrado. El sistema abierto es aquel que abastece el ACS a los diferentes usuarios. El sistema cerrado es aquel que se encarga de suministrar el fluido que circula por el sistema de climatización de las viviendas.

- Bomba de calor (GHP) [2 y 10]

Consiste en una bomba de calor geotérmica capaz de transferir el calor extraído del subsuelo a 15 °C a una fuente a 50 °C.

Con ello, se consigue utilizar los recursos geotérmicos de muy baja temperatura para cubrir las necesidades energéticas y de ACS de una vivienda sin necesidad de apoyarse en otra fuente de energía.

Al igual que en las técnicas de energía geotérmica de baja entalpía, estos sistemas permiten que se extraiga calor de la vivienda en verano utilizando el mismo sistema de captación que el empleado en invierno, logrando así refrigerar la vivienda. Además, si se dispone de piscina, este calor puede ser utilizado para aumentar la temperatura del agua.

A pesar de la presencia de recursos geotérmicos de baja y muy baja temperatura en prácticamente cualquier punto de la superficie terrestre, existen otros puntos en los cuales no es viable el aprovechamiento del calor de las aguas del subsuelo debido a la impermeabilidad de estos suelos o a la profundidad necesaria para la extracción.

Se han investigado varias opciones para sacar beneficio de este calor. Se trata de un circuito cerrado por el que circula un fluido que recorre los intercambiadores colocados en el terreno y posteriormente pasa a la bomba de calor. Existen principalmente dos versiones de este sistema, en función de la disposición de los colectores en el terreno: verticales u horizontales.

La tecnología basada en colectores verticales estriba en ejecutar perforaciones en el terreno hasta cierta profundidad y hacer pasar por esta perforación un doble tubo que contiene el fluido.

Estas perforaciones se pueden realizar hasta una profundidad de entre 10 y 250 metros, siendo habitual efectuarlas entre 50 y 100 metros. En función de la conductividad de los materiales del subsuelo y de la demanda que se requiera, se necesitará un número de sondeos y un esquema determinado.

Se distinguen varios esquemas de distribución de intercambiadores verticales. En cualquier caso, estos se benefician del calor que poseen los materiales geológicos del subsuelo, cediendo dicho calor al local a climatizar. Este sistema es viable gracias a la temperatura constante a cierta profundidad del subsuelo. Un esquema muy común de este sistema vertical es el mostrado en la *Figura 2.7*.

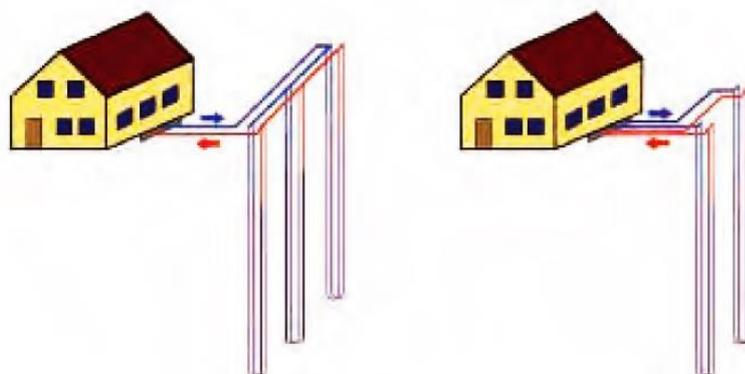


Figura 2.7: Sistema con perforación vertical. [WB4]

La otra versión del sistema de climatización basado en el empleo de bombas de calor es el fundamentado en colectores horizontales. Estos son aconsejables sobre todo cuando se dispone de un amplio terreno donde poder instalarlo. En este caso, este sistema se basa en la colocación de un circuito de tubos en bucle a una profundidad pequeña de la superficie, aproximadamente entre 1 y 2 metros. Esto implica que la temperatura del terreno no sea constante a lo largo del año. Sin embargo, esta oscilación se puede minimizar utilizando esta instalación de modo reversible. La longitud total del intercambiador suele estar entre 30 y 120 metros.

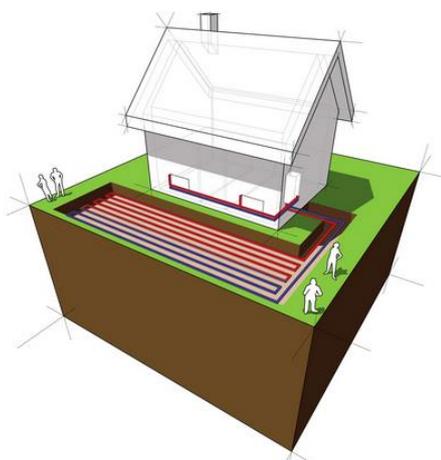


Figura 2.8: Representación de un sistema con captación horizontal.

[WB5]

El esquema explicado anteriormente se puede observar en la *Figura 2.8*. Una instalación de este tipo es capaz de proporcionar el ACS y la climatización de la vivienda, sin requerir el apoyo de ninguna otra energía.

Una práctica habitual del uso de estos sistemas de intercambiadores en una vivienda con jardín, sería realizar una sucesión de perforaciones verticales en un punto del jardín. Por estas perforaciones se les hace pasar las sondas, de tal forma que el fluido que circula por el interior de ellas es capaz de captar o ceder calor del subsuelo para ser enviado posteriormente a la bomba de calor. La bomba de calor, el acumulador y el inversor de ciclo, se pueden encontrar en el interior de la vivienda, por ejemplo, en el garaje.

Las diferencias entre los captadores horizontales y verticales son [11]:

- El sistema de captación vertical es ajeno a la temperatura exterior durante todo el año mientras que el rendimiento del horizontal depende de la estación del año, de las lluvias y de la radiación solar.
- El captador vertical precisa poca superficie del terreno mientras que el horizontal requiere grandes extensiones del terreno.
- El sistema de captación horizontal es más sencillo y económico.
- El sistema de captación vertical requiere menos longitud de tubo.
- Se ha de cuidar la distancia entre perforaciones verticales debido a que si esta es pequeña se pueden presentar cambios de temperatura.
- El sistema de captación horizontal puede suponer un problema para los servicios técnicos añadidos como redes telefónicas y de televisión, desagües, etc.

- El sistema de captación horizontal es más ecológico y limpio debido a que el hueco originado se puede rellenar con el volumen de tierra que se había extraído.

Una ventaja de las bombas de calor de geotermia son sus altos rendimientos energéticos, mayores a los alcanzados mediante otros sistemas. Usualmente se obtienen unos rendimientos entre 3 y 4 [10], pudiendo llegar a 5 o más.

La bomba de calor se puede adaptar a equipos de absorción que utilizan el calor no necesario en verano para la generar frío. En este caso, son los fluidos geotermiales los encargados de suministrar dicho calor.

Estas máquinas, en vez de utilizar un compresor mecánico para realizar el ciclo de absorción, emplean una fuente de calor alternativa que puede ser: vapor, calor residual, agua caliente o gases calientes originados en un quemador.

- Pilotes energéticos (cimentaciones activas)

En Alemania, se ha empezado a investigar la aplicación del uso directo de la energía geotérmica en el ámbito de la construcción. Esta técnica, expuesta en la *Figura 2.9*, es la que se conoce como pilotes energéticos o pilotes base.

Estos pilotes tienen una doble función: en primer lugar, consiguen transmitir las cargas de las fuerzas exteriores al suelo; en segundo lugar, estos elementos también actúan como intercambiadores de calor.

Los intercambiadores del terreno se encuentran por debajo del edificio. Se colocan los tubos en forma de bucle tras la colocación de la armadura y posteriormente se rellenan estos con hormigón [10].

Otra versión de esta tecnología son las denominadas “cimentaciones activas”. Consiste en la distribución de los tubos intercambiadores entre otros elementos estructurales convencionales que se encuentran en la cimentación como: losas, muros pantalla, muros de sótano, revestimiento de túneles, etc.

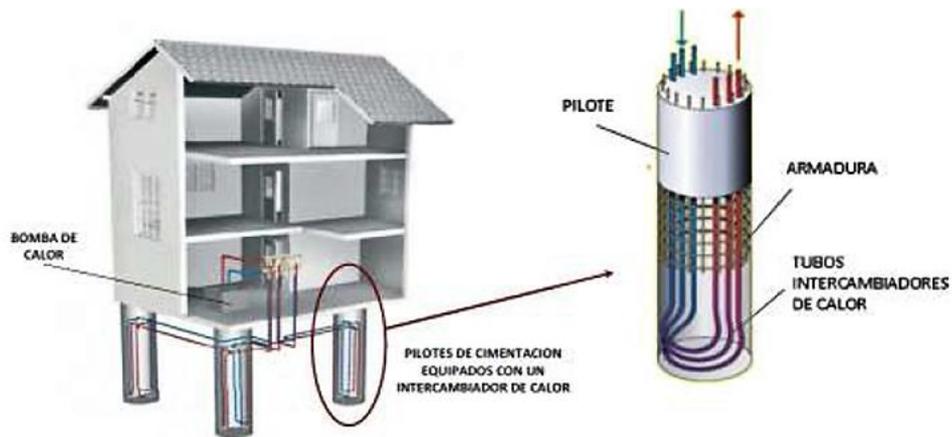


Figura 2.9: Representación de una vivienda con pilotes energéticos. [WB6]

Estos sistemas, al igual que en los comentados anteriormente, pueden ser usados para la producción de frío en verano mediante un ciclo reversible.

Con esta tecnología, otra ventaja que se plantea es que se elude el tener que realizar las perforaciones para la instalación geotérmica, lo cual conlleva a un abaratamiento de la instalación.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

Este TFG toma como referencia una vivienda unifamiliar con una parcela de 300 m². La casa posee 308,49 m² útiles de los cuales 200 m² son climatizados.

3.1. Distribución de la vivienda

La casa consta de tres plantas:

- Planta 0: bodega, cuarto de juegos, cuarto de instalaciones, garaje, W.C. 0 y distribuidor 0.
- Planta 1: cocina, salón, hall, dormitorio 3, W.C. 1, distribuidor 1 y el cortavientos.
- Planta 2: dormitorios 1, 2 y principal, despacho, W.C. 2 y principal, y distribuidor 2.

Las superficies de cada recinto se pueden observar en *la Tabla 3.1*.

Tabla 3.1: Superficies de los recintos.

PLANTA	RECINTO	SUPERFICIE (m ²)
Planta 0	Bodega	13,26
	Cuarto de Juegos	19,68
	Cuarto de Instalaciones	6,80
	Garaje	29,89
	W.C. 0	2,77
	Distribuidor 0	4,26
Planta 1	Cocina	14,25
	Salón	28,80
	Hall	9,66
	Dormitorio 3	11,73
	W.C.1	2,88
	Distribuidor 1	1,404
	Cortavientos	4,42
Planta 2	Dormitorio 1	13,60
	Dormitorio 2	11,56
	Dormitorio Principal	27,79
	Despacho	19,20
	W.C. 2	5,10
	W.C. Principal	6,00
	Distribuidor 2	8,10

A continuación, en la *Figura 3.1*, *Figura 3.2* y *Figura 3.3*, se muestra la distribución de cada local en la Planta 1, 2 y 3 respectivamente, a escala 1:100. Además en la *Figura 3.4* se exhibe la vivienda en 3D.

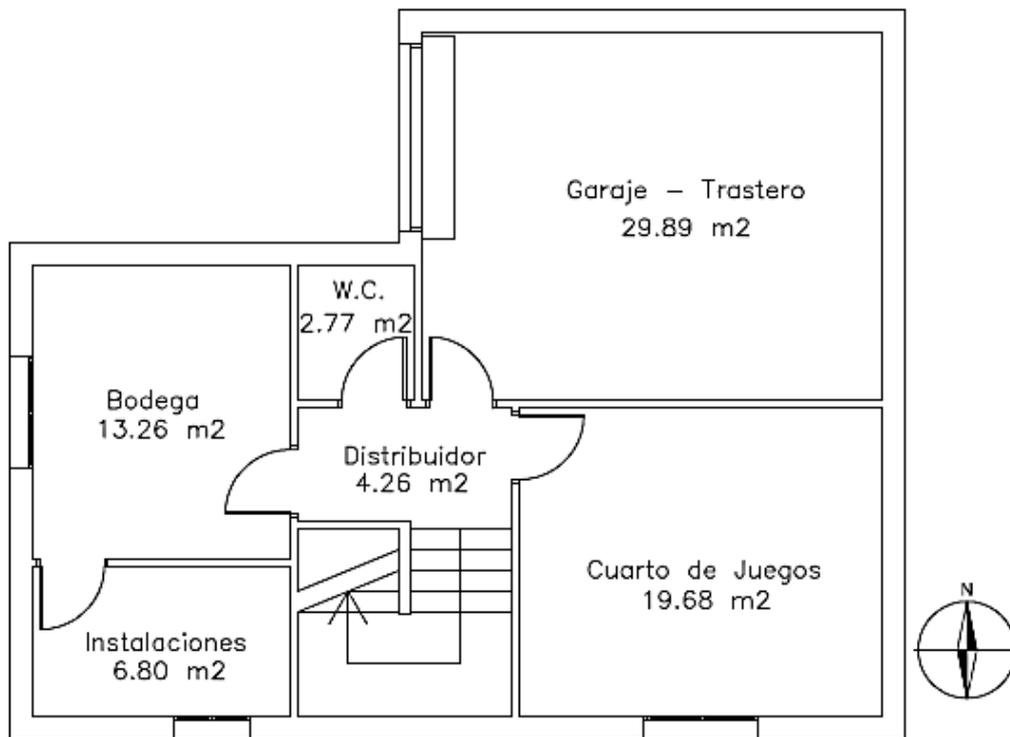


Figura 3.1: Distribución de la Planta 0.

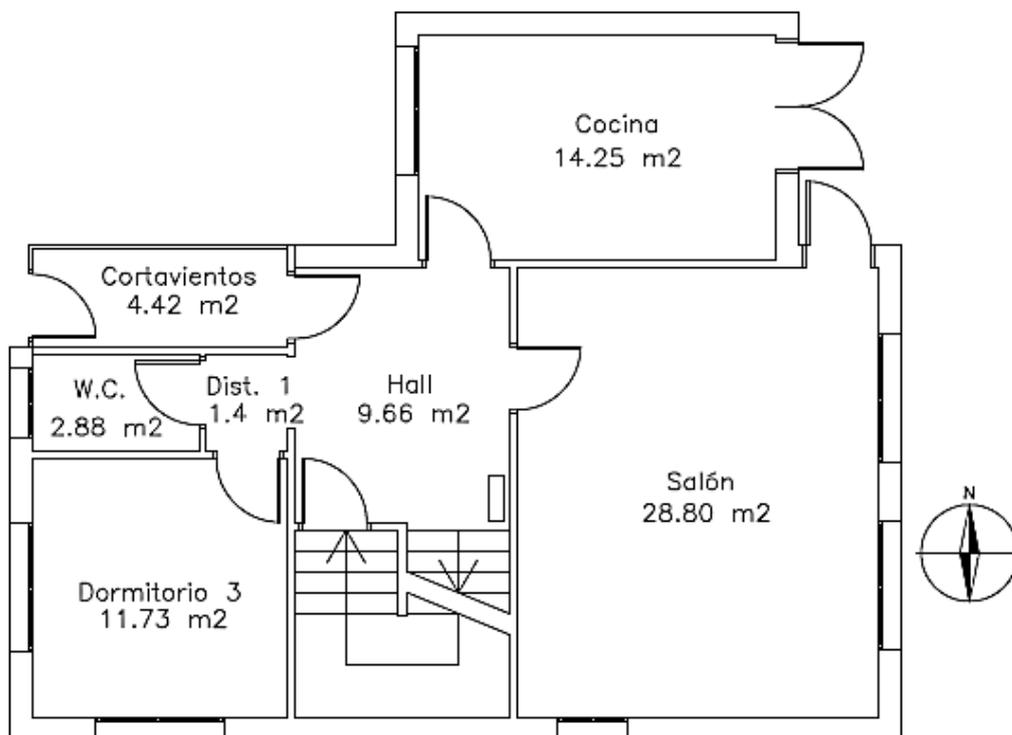


Figura 3.2: Distribución de la Planta 1.

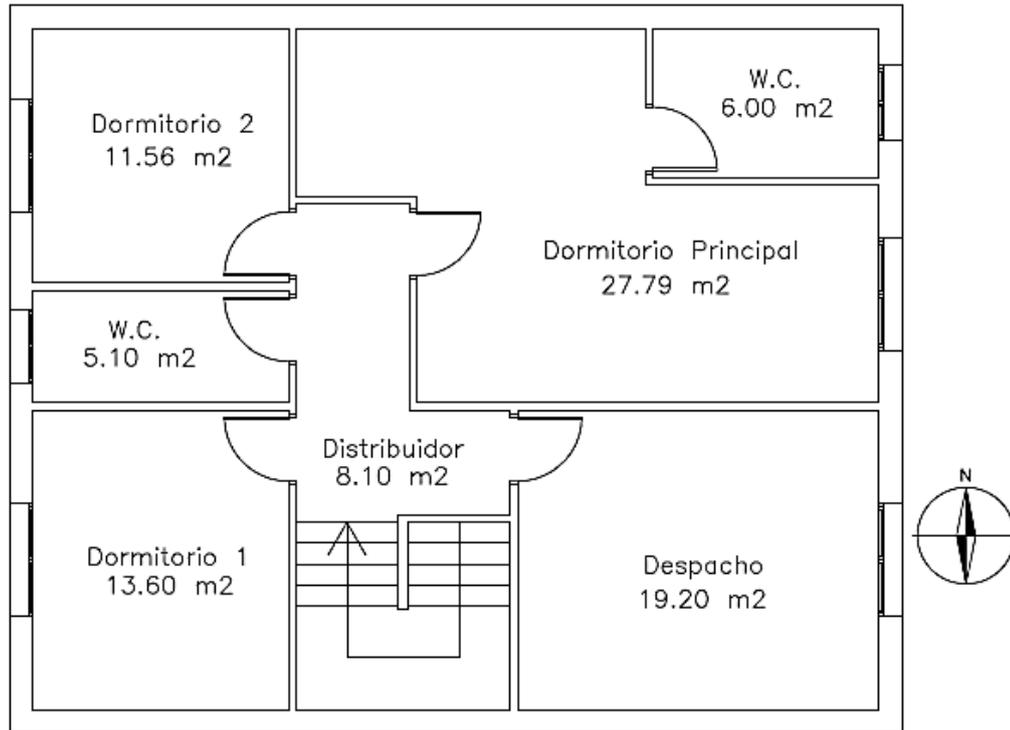


Figura 3.3: Distribución de la Planta 2.

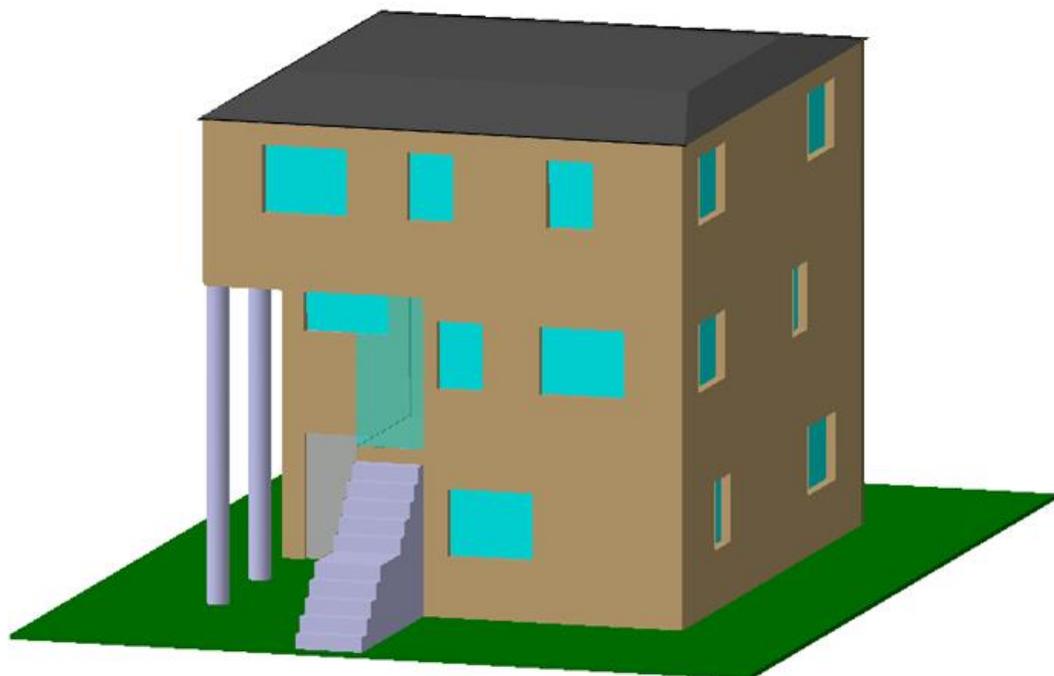


Figura 3.4: Vista de la vivienda en 3D.

3.2. Localización y orientación

La ubicación de la parcela se encuentra en Covaresa Sur, en la localidad de Valladolid.

El ángulo formado por la normal de la fachada principal respecto a la orientación del Norte es de 289° , por lo que la fachada principal posee una orientación Oeste [12], como se observa en la *Figura 3.5*.

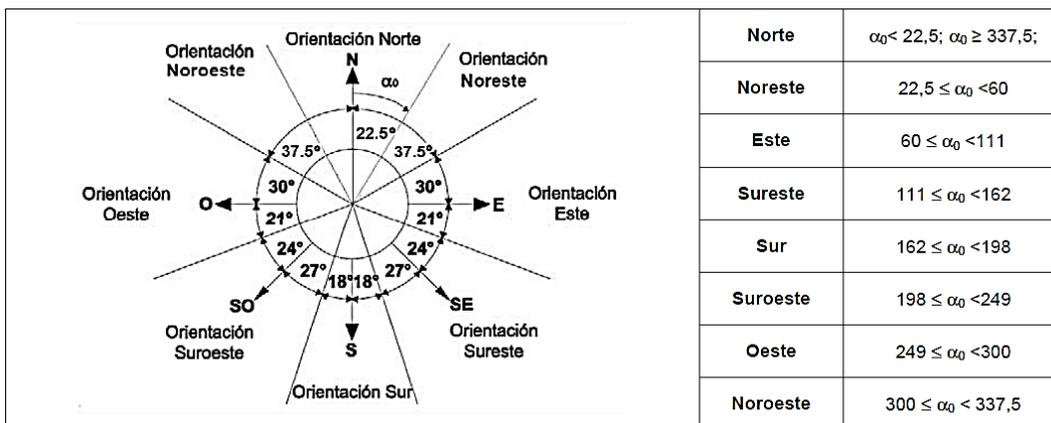


Figura 3.5: Orientación de las fachadas. [12]

3.3. Condiciones climatológicas

Las condiciones climatológicas normales en Valladolid entre los años 1971 y 2000 [13], se pueden observar en la *Tabla 3.2*.

Tabla 3.2: Valores climáticos normales en Valladolid. [WB7]

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	4,0	8,3	0,0	40	83	7	3	0	11	17	4	100
Febrero	6,1	11,4	0,9	32	72	6	2	0	4	12	4	141
Marzo	8,4	15,0	2,3	23	62	5	1	0	2	8	6	209
Abril	10,1	16,3	4,0	44	62	8	1	1	1	4	4	222
Mayo	13,8	20,5	7,2	47	61	9	0	4	1	1	4	260
Junio	18,1	25,9	10,7	33	54	5	0	3	1	0	7	310
Julio	21,7	30,4	13,3	16	47	3	0	3	0	0	15	352
Agosto	21,6	29,8	13,6	18	49	3	0	3	0	0	13	330
Septiembre	18,1	25,7	10,9	31	56	4	0	2	2	0	8	244
Octubre	12,8	18,8	6,9	42	69	7	0	1	3	1	5	176
Noviembre	7,7	12,6	2,9	51	78	6	0	0	8	8	5	114
Diciembre	5,0	8,8	1,3	56	84	8	1	0	10	13	3	81
Total	12,3	18,6	6,2	435	65	71	8	17	42	61	76	2.534

Donde:

T Temperatura media mensual/anual en °C.

TM Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias en °C.

Tm Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias en °C.

R Precipitación mensual/anual media en mm.

- H Humedad relativa media en %.
- DR Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm.
- DN Número medio mensual/anual de días de nieve.
- DT Número medio mensual/anual de días de tormenta.
- DF Número medio mensual/anual de días de niebla.
- DH Número medio mensual/anual de días de helada.
- DD Número medio mensual/anual de días despejados.
- I Número medio mensual/anual de horas de sol.

3.4. Condiciones geológicas

En un proyecto de instalación de geotermia es muy importante conocer las condiciones geológicas donde se va a instalar. Esto se debe a que las conductividades y capacidades térmicas de los diferentes sustratos afectan en gran medida al sistema de captación.

El suelo de Valladolid está compuesto principalmente por gravas, arcilla y arena [14]. En la *Figura 3.6* se expone el mapa hidrogeológico de Valladolid.

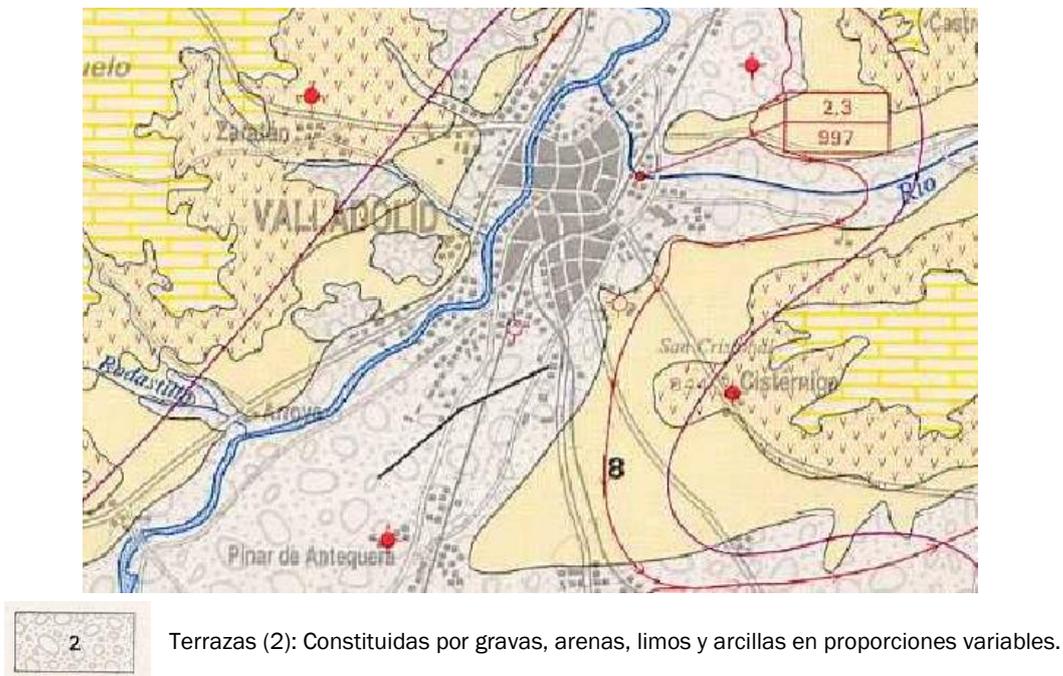


Figura 3.6: Mapa hidrogeológico de Valladolid. [WB8]

Las profundidades de cada compuesto, así como sus conductividades y capacidades térmicas, se indican en la Tabla 3.3 [11].

Tabla 3.3: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos materiales.
Fuente: Paud, D. *Geothermal energy and heat storage*. 2002.

Tipo de sustrato	Profundidad (m)	Conductividad térmica (W/m K)	Capacidad térmica (MJ/m ³ K)
Grava saturada	0 - 5	1,8	2,4
Arcilla/limo saturada	5 - 20	1,7	2
Arena saturada	20 en adelante	2,4	2,3

Dado que cada sustrato tiene una conductividad y capacidad térmica distinta y además se encuentran a diferentes profundidades, se procede a realizar una media ponderada de estas. Además se le incrementa un 10% el valor obtenido para estar del lado de la seguridad. Así:

Conductividad térmica = 2,492 W/m K ; Capacidad térmica = 2,486 W/m³ K

3.5. Normativa aplicable

- Código Técnico de la Edificación (CTE) aprobado por el Real Decreto 214/2006 el 17 de Marzo de 2006.
- Corrección de errores de la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación (BOE 08-noviembre-2013).
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (R.I.T.E) y sus correspondientes I.T.E. aprobado por el Real Decreto 1027/2007 el 20 de Julio de 2007.
- Real Decreto 238/2013, de 5 de Abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Real Decreto 249/2010, de 5 de marzo, por el que se adaptan determinadas disposiciones en materia de energía y minas. Corrección de errores BOE de 23 de abril de 2010.
- Real Decreto 275/1995, de 24 de febrero, por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 92/42/CEE, relativa a los requisitos de rendimiento para las calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos, modificada por la Directiva 93/68/CEE del Consejo.
- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.

- Corrección de errores del Real Decreto 2060/2008 (BOE 260 de 28 de Octubre de 2009).
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.
- Real Decreto 830/2010, de 25 de junio, por el que se establece la normativa reguladora de la capacitación para realizar tratamientos con biocidas.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Real Decreto 138/2011, de 4 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Norma UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
- Norma UNE-EN 15377-2009: Sistemas de calefacción en los edificios. Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua. Parte 1: Determinación de la capacidad nominal de diseño de calefacción y refrigeración. Parte 2: Diseño, dimensionamiento e instalación.
- Norma UNE-EN 1264:2009: Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 1: Definiciones y símbolos. Parte 2: Suelo radiante: Métodos para la determinación de la emisión térmica de los suelos radiantes por cálculo y ensayo.
- Norma UNE-EN 94002-2004: Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la demanda de energía térmica.
- Norma UNE-EN ISO 13790:2011: Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios.
- Norma UNE-EN 14511-2012: Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Parte 1: Términos y definiciones. Parte 2: Condiciones de ensayo. Parte 3: Métodos de ensayo.

CAPÍTULO IV: CARGAS TÉRMICAS

Para conocer la demanda energética de una vivienda se han de definir las cargas térmicas a partir de las cuales se dimensiona la bomba de calor y los sistemas de distribución necesarios para cubrirlas.

El cálculo de cargas térmicas requiere la siguiente información:

- condiciones interiores de la vivienda.
- condiciones ambientales.
- superficies de los locales a climatizar.
- características de los cerramientos exteriores y tabiques interiores.
- orientación de la vivienda.
- actividad que se realiza en el local.
- número de habitantes.

4.1. Condiciones interiores de la vivienda

El cálculo de las cargas térmicas se realiza definiendo, en primer lugar, las condiciones interiores de diseño de la vivienda. Estas se establecen en función de la actividad metabólica de las personas, su grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD), según se fija en el *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios* [15], siguiendo el procedimiento de la Norma UNE-EN ISO 7730:2006 [16]. La *Tabla 4.1* recoge dichos valores, para una actividad metabólica de 1,2 met., una vestimenta de 0,5 clo en verano y de 1 clo en invierno, y un PPD entre el 10 y el 20%:

Tabla 4.1: Condiciones de diseño del interior en una vivienda. [15]

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

Además, se establece que la velocidad media admisible con difusión de mezcla debe ser inferior o igual a 0,14 m/s.

Aunque la temperatura operativa, a efectos prácticos, representa el valor medio de la temperatura seca del aire y de la temperatura radiante de un local, se suele utilizar para el cálculo térmico de edificios así como para el cálculo de algunos índices de confort.

4.2. Condiciones exteriores de diseño

El cálculo de la carga térmica para refrigeración se efectúa partiendo de una temperatura exterior de 33,2°C y una humedad relativa de 25,5%. La temperatura del suelo en Valladolid en verano es de unos 25°C a una profundidad de 20 centímetros [17].

El cálculo de la carga térmica para calefacción se realiza para una temperatura exterior de -5,6°C. La temperatura del terreno en Valladolid en invierno es aproximadamente 5°C a una profundidad de 20 centímetros [17].

4.3. Caracterización térmica de la vivienda

El porcentaje de huecos en cada una de las fachadas de la vivienda se muestra en la *Tabla 4.2*.

Tabla 4.2: Porcentaje de huecos en cada fachada de la vivienda.

		Superficie total (m ²)	Superficie huecos (m ²)	Porcentaje de huecos (%)
Fachada Oeste	Planta 0	21,75	2,322	10,68
	Planta 1	18,875	5,913	31,33
	Planta 2	22,25	4,86	21,84
Fachada Sur	Planta 0	20,5	3,591	17,52
	Planta 1	20,5	3,591	17,52
	Planta 2	20,5	4,644	22,65
Fachada Este	Planta 0	22,5	2,322	10,32
	Planta 1	22	8,342	37,92
	Planta 2	22,25	5,913	26,58
Fachada Norte	Planta 0	32,1	1,269	3,95
	Planta 1	17,85	1,849	10,36
	Planta 2	27,6	0	0

4.3.1. Transmitancia límite de los cerramientos de la vivienda

Se utilizará el *Código Técnico de la Edificación, CTE*, como guía para el cálculo de las necesidades energéticas de la vivienda, concretamente el *Documento Básico "DB-HE Ahorro de Energía"* [12].

Para calcular las cargas adecuadamente, conforme al *DB-HE 1 apartado 1.2*, se puede emplear:

- a) **La opción simplificada**, la cual puede ser aplicada cuando se cumpla:
- La superficie de los huecos en su fachada debe ser inferior al 60% de la superficie de la fachada.
 - La superficie de los lucernarios debe ser inferior al 5% de la superficie de la cubierta.
- b) **La opción general**, la cual puede ser aplicada sin cumplir lo mencionado anteriormente.

Se puede comprobar que en ninguna de las fachadas se excede el 60% de la superficie en huecos. Además la casa no dispone de lucernarios en la cubierta, por lo que se puede aplicar la opción simplificada para el cálculo de cargas.

La demanda energética de los edificios se haya en función de la localidad en la que se ubican [12]. Para conocer cuál es la localidad que se le asocia a la vivienda se debe seguir la *Tabla 4.3*:

Tabla 4.3: Zonas climáticas de la Península Ibérica. [12]

Capital	Z.C.	Altitud	Capital	Z.C.	Altitud
Albacete	D3	677	Lugo	D1	412
Alicante/Alacant	B4	7	Madrid	D3	589
Almería	A4	0	Málaga	A3	0
Ávila	E1	1054	Melilla	A3	130
Badajoz	C4	168	Murcia	B3	25
Barcelona	C2	1	Orense/Ourense	D2	327
Bilbao/Bilbo	C1	214	Oviedo	D1	214
Burgos	E1	861	Palencia	D1	722
Cáceres	C4	385	Palma de Mallorca	B3	1
Cádiz	A3	0	Pamplona/Iruña	D1	456
Castellón/Castelló	B3	18	Pontevedra	C1	77
Ceuta	B3	0	Salamanca	D2	770
Ciudad Real	D3	630	San Sebastián/Donostia	D1	5
Córdoba	B4	113	Santander	C1	1
Coruña, La/ A Coruña	C1	0	Segovia	D2	1013
Cuenca	D2	975	Sevilla	B4	9
Gerona/Girona	D2	143	Soria	E1	984
Granada	C3	754	Tarragona	B3	1
Guadalajara	D3	708	Teruel	D2	995
Huelva	A4	50	Toledo	C4	445
Huesca	D2	432	Valencia/València	B3	8
Jaén	C4	436	Valladolid	D2	704
León	E1	346	Vitoria/Gasteiz	D1	512
Lérida/Lleida	D3	131	Zamora	D2	617
Logroño	D2	379	Zaragoza	D3	207

La vivienda, que está situada en la localidad de Valladolid, pertenece a la zona climática D2.

Para evitar descompensaciones entre la calidad térmica de diferentes espacios, cada uno de los cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica tienen una transmitancia no superior a los valores indicados en la *Tabla 4.4* en función de la zona climática en la que se ubique la vivienda [12].

Tabla 4.4: Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica U en W/m² K. [12]

Cerramientos y particiones interiores	ZONAS A	ZONAS B	ZONAS C	ZONAS D	ZONAS E
Muros de fachada, particiones interiores en contacto con espacios no habitables, primer metro del perímetro de suelos apoyados sobre el terreno ⁽¹⁾ y el primer metro de muros en contacto con el terreno	1,22	1,07	0,95	0,86	0,74
Suelos ⁽²⁾	0,69	0,68	0,65	0,64	0,62
Cubiertas ⁽³⁾	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46
Vidrios y marcos	5,70	5,70	4,70	3,50	3,10
Medianerías	1,22	1,07	1,00	1,00	1,00

⁽¹⁾ Se incluyen las losas o soleras enterradas a una profundidad no mayor de 0,5 m.

⁽²⁾ Las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de cámaras sanitarias, se consideran como suelos.

⁽³⁾ Las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como en el caso de desvanes no habitables, se consideran como cubiertas.

Además, también se establecen unos valores límites de los parámetros característicos medios en función de la zona climática. A la zona D2 le corresponde [12]:

- Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno: $U_{Mlim}: 0,66 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Transmitancia límite de suelos: $U_{Slim}: 0,49 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Transmitancia límite de cubiertas: $U_{Clim}: 0,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Factor solar modificado límite de lucernarios $F_{Llim}: 0,31$.

Tabla 4.5: Valores límites de los parámetros característicos medios. [12]

% de huecos	Transmitancia límite de huecos U_{Hlim} W/m ² K				Factor solar modificado límite de huecos F_{Hlim}					
					Baja carga interna			Alta carga interna		
	N/NE/O	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,5	2,9	3,5	3,5	-	-	-	0,58	-	0,61
de 31 a 40	2,2	2,6	3,4	3,4	-	-	-	0,46	-	0,49
de 41 a 50	2,1	2,5	3,2	3,2	-	-	0,61	0,38	0,54	0,41
de 51 a 60	1,9	2,3	3,0	3,0	0,49	-	0,53	0,33	0,48	0,36

4.3.2. Clasificación de los espacios de la vivienda

Las áreas internas de las viviendas se catalogan en espacios habitables y espacios no habitables. Para calcular la demanda energética, los espacios habitables se catalogan dependiendo del calor que se disipa en el interior, de que tarea se elabore y del tiempo de uso de cada local, en las siguientes clases:

- a) Espacios con carga interna baja: son aquellas áreas en las que se escapa poca cantidad de calor.

Estas áreas están designadas a ser utilizadas como vivienda, ya sea de manera estable u ocasional. Esta clase contiene todas las áreas de edificios de viviendas así como aquellas áreas de edificios destinados a tener una utilización y extensiones parecidas, por ejemplo, cuartos de hoteles, hospitales y salas de estar.

- b) Espacios con carga interna alta: son aquellas áreas en las que se forma una elevada cantidad de calor debido a la iluminación, a los equipos y a las personas que se encuentren presentes. Se consideran pertenecientes a esta clase aquellas áreas que no han sido incluidas en los espacios con carga interna baja [12].

4.3.3. Definición de la envolvente térmica del edificio y clasificación de sus componentes

La envolvente térmica de la vivienda se compone de: los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior y las particiones interiores, que limitan los recintos habitables de los no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.

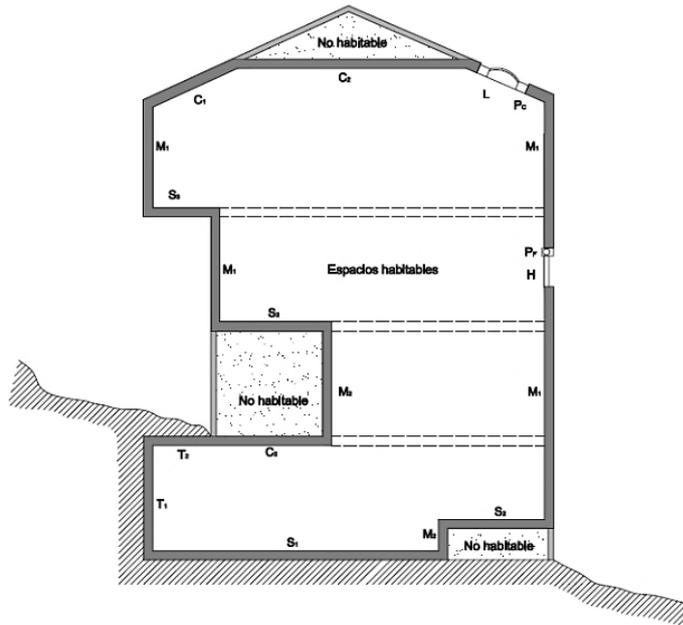


Figura 4.1: Esquema de la envolvente térmica de una vivienda. [12]

Los cerramientos de la vivienda tienen las siguientes características:

Muro exterior

Su objetivo es aislar los espacios habitables del ambiente exterior. Se trata de una fachada multihoja de ladrillo cara vista. Su composición es: 1/2 pie de ladrillo cerámico macizo cara vista tomado con mortero bastardo de cemento, arena y cal, enfoscado interiormente, aislamiento térmico y hoja interior de tabicón de ladrillo cerámico guarnecida y enlucida con yeso en su cara interior. Las características se muestran en la *Tabla 4.6*.

Tabla 4.6: Características del muro exterior.

Elemento	e (m)	λ (W /m K)	R (m ² K/W)
Ladrillo perforado cara vista	0,115	0,76	0,15
Enfoscado de cemento	0,02	1,3	0,015
Poliestireno expandido	0,06	0,04	1,5
Ladrillo Cerámico Hueco	0,07	0,437	0,16
Guarnecido de Yeso	0,015	0,25	0,06
R Total			1,887

El coeficiente global de transmisión de un cerramiento se calcula a partir de la *Ecuación 4.1*.

$$U_F = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (Ec. 4.1)$$

La HE1, establece que $R_{si} = 0,13$ y que $R_{se} = 0,04$. Utilizando la Ecuación 4.1, se tiene una transmitancia térmica de los muros:

$$U_F = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{1}{0,13 + 1,887 + 0,04} = 0,49 \frac{W}{m^2K}$$

Tabique interior

Está destinado a separar los espacios habitables de los no habitables. Su composición es: una capa de guarnecido de yeso, posteriormente se coloca el aislante compuesto por poliestireno expandido, un ladrillo cerámico hueco y finalmente otra capa de guarnecido de yeso. Las características se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Características del tabique interior.

Elemento	e (m)	λ (W /m K)	R (m ² K/W)
Guarnecido de yeso	0,015	0,57	0,026
Poliestireno expandido	0,03	0,042	0,71
Ladrillo Cerámico Hueco	0,07	0,437	0,16
Guarnecido de Yeso	0,015	0,57	0,026
R Total			0,93

La HE1, indica que $R_{si} = 0,13$ y que $R_{se} = 0,13$, en este caso. Usando la Ecuación 4.1, se da una transmitancia térmica de los tabiques:

$$U_{tabique} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{1}{0,13 + 0,93 + 0,13} = 0,84 \frac{W}{m^2K}$$

Forjado interior

Su misión es delimitar los espacios habitables de los no habitables cuando se encuentran en dos plantas diferentes colindantes. Está formado por un parqué que actúa como suelo, mortero de cemento, el entrevigado y una capa de guarnecido de yeso. Las características se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Características del forjado interior.

Elemento	e (m)	λ (W /m K)	R (m ² K/W)
Madera	0,025	0,15	0,17
Mortero	0,04	0,55	0,073
Entrevigado de EPS	0,2	0,341	0,59
Guarnecido de Yeso	0,015	0,25	0,06
R Total			0,886

La HE1, fija que $R_{si} = 0,17$ y que $R_{se} = 0,17$, en esta ocasión. A partir de la Ecuación 4.1, se halla la transmitancia térmica del forjado interior:

$$U_{forjado\ interior} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{1}{0,17 + 0,886 + 0,17} = 0,816 \frac{W}{m^2K}$$

Suelo

Su tarea es separar los espacios habitables del terreno. Se constituye por una baldosa cerámica, mortero de cemento, un aislante que será lana de roca, y la solera de hormigón. Las características se muestran en la *Tabla 4.9*.

Tabla 4.9: Características del suelo.

Elemento	e (m)	λ (W /m K)	R (m ² K/W)
Baldosa cerámica	0,02	2,3	0,0087
Mortero	0,05	0,55	0,091
Lana de Roca	0,07	0,04	1,75
Solera hormigón	0,2	2,3	0,087
R Total			1,94

La HE1, establece que $R_{si} = 0,17$, en este caso. Mediante la *Ecuación 4.1*, se calcula la transmitancia térmica del suelo:

$$U_{suelo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{1}{0,17 + 1,94} = 0,47 \frac{W}{m^2K}$$

Cubierta

Está destinado a separar los espacios habitables del exterior mediante un cerramiento horizontal. Las características se muestran en la *Tabla 4.10*.

Tabla 4.10: Características de la cubierta.

Elemento	e (m)	λ (W /m K)	R (m ² K/W)
Teja	0,1	0,24	0,42
Mortero	0,04	0,55	0,073
Poliestireno expandido	0,06	0,04	1,5
Entrevigado de EPS	0,2	0,341	0,59
Guarnecido de Yeso	0,015	0,25	0,06
R Total			2,64

La HE1, establece que $R_{si} = 0,1$ y que $R_{se} = 0,04$, en esta ocasión. Usando la *Ecuación 4.1*, se tiene una transmitancia térmica de la cubierta:

$$U_{cubierta} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_1^j \frac{e_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}}} = \frac{1}{0,1 + 2,64 + 0,04} = 0,36 \frac{W}{m^2K}$$

Ventana y puertas

La vivienda dispone de dos tipos de ventanas:

- Ventana 1: Altura: 1,12 metros. Anchura: 1,24 metros. Altura y anchura del hueco 1,35 y 1,72 metros, respectivamente.
- Ventana 2: Altura: 1,12 metros. Anchura: 0,59 metros. Altura y anchura del hueco 1,35 y 0,94 metros, respectivamente.

La vivienda dispone de dos tipos de puertas:

- Puerta cocina: Altura: 1,9 metros. Anchura: 1,24 metros. Altura y anchura del hueco 2,15 y 1,72 metros, respectivamente.
- Puerta salón: Altura: 1,9 metros. Anchura: 0,62 metros. Altura y anchura del hueco 2,15 y 0,86 metros, respectivamente.

Transmitancia

Se calcula la transmitancia de ambos tipos de ventanas a partir de la *Ecuación 4.2* [12]:

$$U_H = (1 - FM) \cdot U_{H,V} + FM \cdot U_{H,m} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

U_H es la transmitancia térmica de los huecos en $\text{W/m}^2 \text{ K}$.

$U_{H,V}$ es la transmitancia térmica de la parte semitransparente en $\text{W/m}^2 \text{ K}$.

$U_{H,m}$ es la transmitancia térmica del marco en $\text{W/m}^2 \text{ K}$.

FM es la fracción del hueco ocupada por el marco.

A partir de los datos de cada tipo de ventana y puerta, se halla la fracción del hueco ocupada por el marco.

- Para la ventana 1 es 40,19%.
- Para la ventana 2 es 47,93%.
- Para la puerta de la cocina es 36,97%.
- Para la puerta del salón es 36,27%.

La transmitancia térmica de la ventana es $2,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para ambas ventanas y puertas, y la transmitancia térmica de los marcos es $1,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Sustituyendo en la *Ecuación 4.2* se obtiene:

- Ventana 1

$$U_H = (1 - 0,4019) \cdot 2,4 + 0,4019 \cdot 1,6 = 2,08 \frac{W}{m^2 K}$$

- Ventana 2

$$U_H = (1 - 0,4793) \cdot 2,4 + 0,4793 \cdot 1,6 = 2,02 \frac{W}{m^2 K}$$

- Puerta de la cocina y del salón

$$U_H = (1 - 0,3697) \cdot 2,4 + 0,3697 \cdot 1,6 = 2,104 \frac{W}{m^2 K}$$

Factor Solar

El factor solar se calcula a partir la Ecuación 4.3 [12]:

$$F = F_S \cdot [(1 - FM) \cdot g + FM \cdot 0,04 \cdot U_m \cdot \alpha] \quad (Ec. 4.3)$$

Donde:

F_S es el factor sombra del hueco o lucernario.

FM es la fracción del hueco ocupada por el marco.

g es el factor solar de la parte semitransparente del hueco. Se estima un valor de 0,75 aproximadamente.

U_m es la transmitancia térmica del marco en $W/m^2 K$.

α es la absorptividad del marco.

El cálculo del factor sombra del hueco se realiza a partir de la *Tabla 12* de la HE1. El factor sombra del hueco depende de cómo este orientado, por lo tanto habrá diferencias en función de la orientación en la que se encuentre.

Tabla 4.11: Factor Solar del hueco. Retranqueo.

	R	S	W	Factor solar del hueco			
				N	S	E	O
Ventana grande	0,32	1,3	1,6	-	0,51	0,68	0,68
Ventana pequeña	0,32	1,3	0,8	1	0,39	0,61	0,61
Puerta de la cocina	0,35	2,16	1,6	-	-	0,76	-
Puerta del salón	0,35	2,16	0,8	1	-	-	-

La absorptividad del marco se obtiene a partir de la *Tabla 10* de la HE1. Al ser el marco de color negro $\rightarrow \alpha = 0,96$.

Finalmente, sustituyendo los valores en la *Ecuación 4.3* se obtiene un factor solar en función de la orientación de nuevo.

Tabla 4.12: Factor Solar.

	Factor solar del hueco			
	N	S	E	O
Ventana grande	-	0,2414	0,3218	0,3218
Ventana pequeña	0,42	0,1638	0,2562	0,2562
Puerta de la cocina	-	-	0,38	-
Puerta del salón	0,50	-	-	-

4.4. Cálculo de cargas térmicas

Una carga térmica es aquella perturbación con capacidad de modificar la energía presente en los locales que se buscan climatizar. Es una potencia que se mide en kW y sirve para dimensionar los equipos que se van a emplear. Dicho de otra forma, son los kW necesarios para mantener la temperatura y la humedad requeridas en el interior de los locales.

Las perturbaciones tienen su origen en las condiciones climatológicas del espacio externo que rodea a los recintos o en las fuentes de energía localizadas en el interior de los propios espacios.

Si las perturbaciones alteran la temperatura de los locales se denominan cargas sensibles.

Si las perturbaciones varían el contenido de vapor de agua, que a su vez modifica el contenido energético del volumen de control, la carga se denomina carga latente.

Las cargas térmicas también se pueden clasificar en cargas exteriores, las cuales proceden del exterior, y cargas interiores, las cuales proceden del interior del recinto. Además también se puede distinguir las cargas con inercia térmica, las cuales no se producen instantáneamente en el local, sino que se acumula en el interior.

No es la misma carga térmica para el cálculo de refrigeración y calefacción. Para el cálculo de las cargas térmicas de calefacción, no se tiene en cuenta la carga térmica latente. Por ello, se suele hablar de cargas de invierno y de cargas de verano.

Independientemente de que se calcule para una estación u otra, se realiza el cálculo para las condiciones más adversas.

4.4.1. Cargas térmicas de calefacción

Carga térmica de transmisión

La carga debida a la transmisión de calor por los cerramientos se evalúa fácilmente como el calor ganado o perdido mediante la *Ecuación 4.4* [18]:

$$Q_{trans} = U_m \cdot A \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (Ec. 4.4)$$

Donde:

Q es el calor intercambiado en W.

U es el coeficiente global de transmisión en W/m² K.

A es el área expuesta a esa transmisión en m².

T_{int} es la temperatura del interior del local en K.

T_{ext} es la temperatura que existe en el exterior en K. Si se está calculando con respecto a un recinto no habitable, la temperatura de este es la media entre la temperatura en el interior y la ambiente.

Ventilación

El cálculo de la ventilación es imprescindible atendiendo a razones de salubridad. La ventilación además influye en la carga térmica debido a que las leyes nacionales piden un determinado caudal de renovación del aire en función de la actividad que se realice en el local. Se calcula mediante la *Ecuación 4.5* [18]:

$$Q_{vent_{sen}} = V_a \cdot \rho_a \cdot Cp_a \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (Ec. 4.5)$$

Donde:

$Q_{vent_{sen}}$ es la carga de ventilación o infiltración sensible en W.

V_a es el caudal de aire en m³/s. Depende de la actividad que se realiza en el local.

ρ_a es la densidad del aire en kg/m³.

Cp_a es el calor específico del aire en J/kg K.

T_{int} es la temperatura en el interior en K.

T_{ext} es la temperatura en el exterior en K.

También existen aportaciones debidas a las cargas internas, a la radiación y la ocupación de las personas, pero al tratarse de un aporte “gratuito” de calor, no se tendrán en cuenta en el dimensionamiento de la calefacción debido a que éste se realiza para los casos más desfavorables.

4.4.2. Cargas térmicas de refrigeración

Carga térmica de transmisión

Se calcula de igual modo que las cargas térmicas de transmisión de calefacción, variando en este caso las condiciones del ambiente e interiores.

Carga térmicas de radiación

Es la carga sensible debida al paso de radiación solar a través de las superficies acristaladas.

La radiación que incide en un hueco se ve afectada por distintos obstáculos, tales como persianas, cortinas, etc. Además, influyen otros edificios o elementos que produzcan sombras. Se calcula mediante la *Ecuación 4.6* [18]:

$$Q_{rad} = \sum_{or} I_{or} \cdot A_{or} \cdot f_c \quad (Ec. 4.6)$$

Donde:

Q_{rad} es la carga térmica por radiación en W.

I_{or} es la irradiancia solar para una orientación en W/m².

A_{or} es la superficie acristalada en una orientación en m².

f_c es un factor de corrección.

Ventilación

En este caso también coincide el cálculo de las cargas térmicas sensibles con el calculado para calefacción, pero se le añade una carga térmica latente que se calcula mediante la *Ecuación 4.7* [18]:

$$Q_{vent_{lat}} = V_a \cdot \rho_a \cdot h_{fg}(w_{int} - w_{ext}) \quad (Ec. 4.7)$$

Donde:

$Q_{vent_{lat}}$ es la carga de ventilación o infiltración sensible en W.

V_a es el caudal de aire en m^3/s . Depende de la actividad que se realiza en el local.

ρ_a es la densidad del aire en kg/m^3 .

h_{fg} es la entalpía de cambio de fase del agua en J/kg .

w es la humedad en el interior o en el exterior según el subíndice.

Cargas sensibles por aportaciones internas

Son aquellas fuentes de calor que son originadas dentro del local. Se pueden distinguir:

- Por iluminación

La contribución de la iluminación interior del local se calcula suponiendo que la potencia de cada sistema de iluminación se convierte en calor sensible.

Existen dos clases principales de luminarias de interior: fluorescente e incandescente. Para el caso de las luminarias de tipo fluorescente, se tiene en cuenta la posible incorporación de una reactancia, por lo que se le multiplica por un factor de 1,25.

Fluorescente sin reactancia: Se calcula mediante la *Ecuación 4.8* [18]:

$$Q_{sen}(i) = n \cdot Q_{sen,lum} \cdot \sum_0^{24} K_f(i) \cdot FC(i) \quad (Ec. 4.8)$$

Fluorescente con reactancia: Se calcula mediante la *Ecuación 4.9* [18]:

$$Q_{sen}(i) = 1,25 \cdot n \cdot Q_{sen,lum} \cdot \sum_0^{24} K_f(i) \cdot FC(i) \quad (Ec. 4.9)$$

Incandescente: Se calcula mediante la *Ecuación 4.10* [18]:

$$Q_{sen}(i) = 1,25 \cdot n \cdot Q_{sen,lum} \cdot \sum_0^{24} K_i(i) \cdot FC(i) \quad (Ec. 4.10)$$

Donde:

$Q_{sen}(i)$ es la carga asociada a la luminaria en W.

$Q_{sen,lum}$ es la potencia de la luminaria en W.

n es el número de luminarias.

- $K_f(i)$ es el coeficiente de inercia para luminarias fluorescentes.
- $K_i(i)$ es el coeficiente de inercia para luminarias incandescentes.
- $FC(i)$ es la fracción de carga.

- Por ocupación

Las personas que permanecen en un local, desde el punto de vista del cálculo, son fuentes de energía transmitida por:

- Conducción: se ocasiona por el contacto con objetos.
- Convección: se origina porque la temperatura del cuerpo es superior a la del aire.
- Radiación: se produce debido a que la temperatura del cuerpo es superior a la de otros objetos.
- Respiración: al exhalar el aire, éste se encuentra a una temperatura superior. Además se aumenta la humedad relativa del aire ya que se aporta cierto vapor de agua.
- Evaporación cutánea.

Por lo tanto, la carga por ocupación aporta tanto carga latente como sensible. Se calculan mediante la *Ecuación 4.11* y la *Ecuación 4.12* respectivamente. La potencia generada depende del tipo de actividad y de la temperatura del local, esencialmente [18].

$$Q_{lat} = Q_{lat,pers} \cdot n \cdot FC \quad (Ec. 4.11)$$

$$Q_{sen}(i) = Q_{sen,pers} \cdot \sum_0^{24} K(i) \cdot n(i) \cdot FC(i) \quad (Ec. 4.12)$$

Donde:

Q_{lat} es la carga latente en W.

$Q_{sen}(i)$ es la carga sensible en W.

$Q_{lat,pers}$ es la potencia latente por persona a la temperatura del local en W.

$Q_{sen,pers}$ es la potencia sensible por persona a la temperatura del local en W.

n es el número de personas a la hora del cálculo.

$K(i)$ es el coeficiente de inercia.

$FC(i)$ es la fracción de carga.

- Por aparatos eléctricos

Se considera que la potencia de los aparatos eléctricos, como electrodomésticos, ordenadores, televisiones, etc., se convierte en calor sensible para el local. De todas formas, también se supone que no todos los equipos funcionan a la vez por lo que se le aplica un coeficiente de simultaneidad de 0,75 a la suma obtenida de todas las potencias.

4.4.3. Módulo de cargas

Una vez que se han resumido las consideraciones que se deben de tener en cuenta para el cálculo de cargas, se puede proceder a éste mediante cálculos manuales o con programas informáticos. En este Trabajo Fin de Grado, se ha optado por utilizar el software *CalculoAire* de Saunier Duval. En la *Figura 4.2*, se muestra la pantalla inicial de dicho programa.

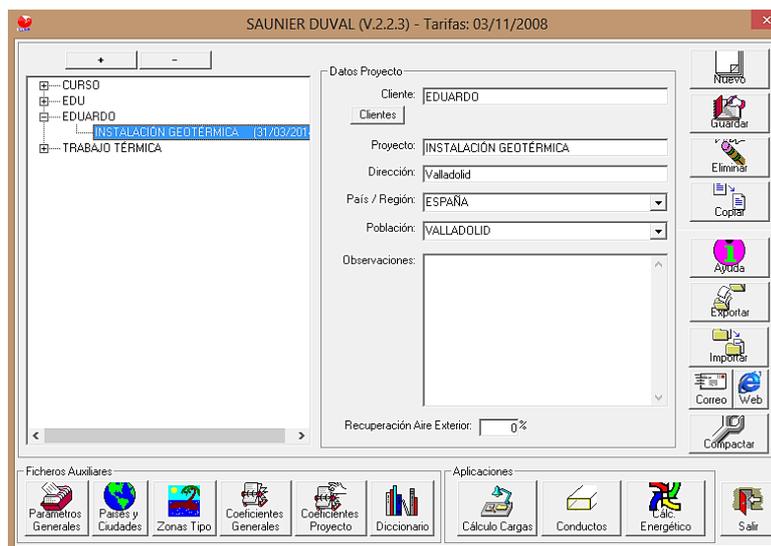


Figura 4.2: Pantalla inicial de CalculoAire. [WB9]

El programa se basa en el método de transferencia para calcular las cargas por cerramientos. Este método se basa en “El Principio del Factor de Respuesta”. Este principio explica que para cierto recinto, los patrones de respuesta térmica para un determinado tipo de ganancia de calor siempre serán los mismos. El valor de las cargas puede ser distinto, pero el patrón de conversión de ganancia de calor a carga será igual. Se subdivide en tres principios adicionales:

- Principio de superposición: La carga térmica total obtenida para un recinto es la misma que si se sumase cada una de las cargas térmicas para cada ganancia de calor.

- Principio de linealidad: La dimensión de la respuesta térmica a una ganancia de calor es una función lineal que depende del tamaño de la ganancia de calor.
- Principio de invariabilidad: Las ganancias de calor que tengan la misma magnitud, aunque se den en tiempos distintos, ocasionan una respuesta térmica idéntica.

La aplicación simultánea de estos principios posibilita la simplificación del procedimiento del equilibrio térmico:

- El principio de superposición permite simplificar los problemas de cálculo de equilibrio térmico al posibilitar calcular cargas térmicas de forma independiente.
- El principio de superposición posibilita además calcular por separado las consecuencias de las ganancias térmicas cada hora. Por ejemplo, una ganancia de calor de iluminación ocasionará cargas en la hora actual y en las siguientes. Esto se debe a que la ganancia de calor es absorbida por las paredes y elementos presentes en el recinto, para más tarde ser transferida por medio de convección al aire a lo largo del tiempo.
- Los principios de linealidad e invariabilidad hace posible el prescindir de cálculos complicados. Esto es debido a que el patrón de cargas obtenido para cada ganancia de calor es invariable, de esta forma, solamente se requiere calcular dicho patrón una vez a partir de equilibrio térmico.

El método de transferencia se basa en establecer una relación matemática que representa la carga térmica en función de la ganancia térmica, el tiempo y coeficientes de la función de transferencia. A partir de esta ecuación se puede hallar de forma simple las cargas originadas a cada hora. Esta relación matemática viene expresada por la *Ecuación 4.13*.

$$Q_0 = v_0 \cdot q_0 + v_1 \cdot q_1 + v_2 \cdot q_2 - w_1 \cdot Q_1 - w_2 \cdot Q_2 \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Donde:

Q es una carga. El índice representa el tiempo: 0 es la hora actual, 1 es la hora anterior y 2 es la hora previa a la anterior.

q es una ganancia de calor.

v_i y w_i son coeficientes de la función de transferencia. Dependen de ganancia de calor y local.

La *Ecuación 4.13* representa que la carga de la hora actual (Q_0) depende de la ganancia de calor de dicha hora, de las dos anteriores y de las cargas previas de las dos horas anteriores. Al mismo tiempo, las cargas previas de las dos horas anteriores son función de las ganancias de calor de horas anteriores. Por lo tanto, la carga de la hora actual es función de una gran cantidad de ganancias de calor de horas previas.

El software realiza un cálculo de cargas para cada hora, día y mes del año, corrigiendo tanto la temperatura húmeda como la seca.

Para el cálculo de cargas, es necesario introducir en el programa los datos de las condiciones climáticas y su orientación, los horarios de uso, los coeficientes de transmisión de los materiales de construcción, la distribución del edificio, la superficie y altura de cada local así como de qué tipo de local se trata, el número de habitantes y los datos sobre el sistema de climatización y ventilación seleccionados.

Como resumen de los datos sobre los coeficientes de transmisión de los materiales empleados puede ser:

Cerramiento exterior:

- Coeficiente de transmisión de los muros: $0,49 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Coeficiente de transmisión de cristales:
 - Ventana grande: $2,08 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
 - Ventana pequeña: $2,02 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
 - Puerta de la cocina y del salón: $2,104 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Factor Solar: se puede observar en la *Tabla 4.12*.

Interior:

- Coeficiente de transmisión del tabique interior: $0,84 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Coeficiente de transmisión del forjado interior: $0,816 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Suelo y cubierta:

- Coeficiente de transmisión del suelo: $0,47 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Coeficiente de transmisión de la cubierta: $0,36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Iluminación: Se trata de incandescentes de $0,80 \text{ W/m}^2$.

A continuación, se muestra, en las *Tablas 4.13-4.29*, las cargas obtenidas para cada local de la vivienda. Además la *Tabla 4.30* recoge un resumen del total de las cargas y la *Tabla 4.31* exhibe un resumen de las cargas de cada local.

PLANTA 0

Tabla 4.13: Cargas térmicas en la Bodega.

BODEGA			
Superficie	13,3 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	65%	Ventilación	33 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	413	-	599
Total cargas internas	401	175	262
Cargas totales: convencional	989		861
Cargas totales: suelo radiante	870		632

Tabla 4.14: Cargas térmicas en el Cuarto de Juegos.

Cuarto de Juegos			
Superficie	19,7 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	65%	Ventilación	43 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	564	-	820
Total cargas internas	442	117	365
Cargas totales: convencional	1.123		1.185
Cargas totales: suelo radiante	1.043		884

Tabla 4.15: Cargas térmicas en el W.C. 0.

W.C.0			
Superficie	2,8 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	70%	Ventilación	13 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	73	-	194
Total cargas internas	73	-	128
Cargas totales: convencional	146		322
Cargas totales: suelo radiante	133		263

Tabla 4.16: Cargas térmicas en el Distribuidor 0.

Distribuidor 0			
Superficie	4,3 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	60%	Ventilación	0 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	26	-	73
Total cargas internas	44	-	-
Cargas totales: convencional	70		73
Cargas totales: suelo radiante	70		46

PLANTA 1

Tabla 4.17: Cargas térmicas en el Salón.

Salón			
Superficie	28,8 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	65%	Ventilación	66 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	633	-	868
Total cargas internas	736	233	561
Cargas totales: convencional	1.602		1.429
Cargas totales: suelo radiante	1.506		1.110

Tabla 4.18: Cargas térmicas en la Cocina.

Cocina			
Superficie	14,3 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	20 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	70%	Ventilación	7 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	618	-	870
Total cargas internas	28	11	58
Cargas totales: convencional	657		928
Cargas totales: suelo radiante	545		611

Tabla 4.19: Cargas térmicas en el Hall.

Hall			
Superficie	9,7 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	60%	Ventilación	0 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	30	-	74
Total cargas internas	138	22	-
Cargas totales: convencional	184		74
Cargas totales: suelo radiante	177		48

Tabla 4.20: Cargas térmicas en el W.C.1.

W.C.1			
Superficie	2,9 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	70%	Ventilación	38 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	202	-	183
Total cargas internas	136	11	374
Cargas totales: convencional	349		557
Cargas totales: suelo radiante	251		501

Tabla 4.21: Cargas térmicas en el Distribuidor 1.

Distribuidor 1			
Superficie	1,4 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	60%	Ventilación	0 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	15	-	37
Total cargas internas	22	11	0
Cargas totales: convencional	48		37
Cargas totales: suelo radiante	47		24

Tabla 4.22: Cargas térmicas en el Dormitorio 3.

Dormitorio 3			
Superficie	11,7 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	60%	Ventilación	21 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	236	-	485
Total cargas internas	112	88	207
Cargas totales: convencional	436		692
Cargas totales: suelo radiante	436		544

PLANTA 2

Tabla 4.23: Cargas térmicas en el Dormitorio 1.

Dormitorio 1			
Superficie	13,6 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	60%	Ventilación	24 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	342	-	589
Total cargas internas	111	88	236
Cargas totales: convencional	541		825
Cargas totales: suelo radiante	541		645

Tabla 4.24: Cargas térmicas en el Dormitorio 2.

Dormitorio 2			
Superficie	11,6 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	60%	Ventilación	21 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	313	-	488
Total cargas internas	103	88	207
Cargas totales: convencional	504		695
Cargas totales: suelo radiante	485		547

Tabla 4.25: Cargas térmicas en el Dormitorio Principal.

Dormitorio Principal			
Superficie	27,8 m ²	Altura	3 m
T ^a Invierno	21 °C	T ^a Verano	26 °C
HR %	60%	Ventilación	50 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	400	-	693
Total cargas internas	224	176	492
Cargas totales: convencional	800		1.185
Cargas totales: suelo radiante	733		974

Tabla 4.26: Cargas térmicas en el Despacho.

Despacho			
Superficie	19,2 m ²	Altura	3 m
T ^a Invierno	21 °C	T ^a Verano	24 °C
HR %	65%	Ventilación	44 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	718	-	688
Total cargas internas	576	233	351
Cargas totales: convencional	1.527		1.039
Cargas totales: suelo radiante	1.354		777

Tabla 4.27: Cargas térmicas en el W.C. Principal.

W.C. Principal			
Superficie	6 m ²	Altura	3 m
T ^a Invierno	21 °C	T ^a Verano	26 °C
HR %	70%	Ventilación	45 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	160	-	282
Total cargas internas	210	11	443
Cargas totales: convencional	381		725
Cargas totales: suelo radiante	362		639

Tabla 4.28: Cargas térmicas en el W.C. 2.

W.C. 2			
Superficie	5,1 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	26 °C
HR %	70%	Ventilación	43 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	250	-	164
Total cargas internas	188	11	423
Cargas totales: convencional	449		587
Cargas totales: suelo radiante	337		538

Tabla 4.29: Cargas térmicas en el Distribuidor 2.

Distribuidor 2			
Superficie	8,1 m ²	Altura	3 m
Tª Invierno	21 °C	Tª Verano	24 °C
HR %	70%	Ventilación	0 m ³ /h
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	116	-	82
Total cargas internas	99	11	0
Cargas totales: convencional	226		82
Cargas totales: suelo radiante	193		56

Tabla 4.30: Cargas térmicas totales en la vivienda.

General			
Superficie	200 m ²	Altura	3 m
Verano (W)		Invierno (W)	
Sensible	Latente	Sensible	
Total cargas estructurales	5.109	-	7.189
Total cargas internas	3.643	1.286	4.107
Cargas totales: convencional	10.038		11.296
Cargas totales: suelo radiante	9.083		8.839

Tabla 4.31: Resumen cargas térmicas de cada local de la vivienda.

	Verano (W)	Invierno (W)
Bodega	870	632
Cuarto de Juegos	1.043	884
W.C. 0	133	263
Distribuidor 0	70	46
Salón	1.506	1.110
Cocina	545	611
Hall	177	48
W.C. 1	251	501
Distribuidor 1	47	24
Dormitorio 3	436	544
Dormitorio 1	541	645
Dormitorio 2	485	547
Dormitorio Principal	733	974
Despacho	1.354	777
W.C. Principal	362	639
W.C. 2	337	538
Distribuidor 2	193	56
TOTAL	9.083	8.839

CAPÍTULO V: SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Tras realizar el cálculo de las cargas térmicas de la vivienda, se procede a plasmar el sistema de distribución escogido. En este proyecto se ha optado por climatizar la vivienda mediante un sistema de suelo radiante/refrescante, el cual se considera muy óptimo cuando se combina con la energía geotérmica.

5.1. Sistema de climatización a partir de suelo radiante/refrescante

El sistema de climatización mediante suelo radiante puede usarse tanto para calefactar como para refrescar un local. La implementación de este sistema consiste en hacer pasar un entramado de tubos a través de techos, paredes o suelos, siendo este último el más común.

Este procedimiento se basa en la circulación de un fluido a través de una serie de circuitos constituidos por tubos de polibutileno (en este caso) a una temperatura moderada, en torno a 30-50°C en invierno (nunca superando los 55°C) y 16°C en verano, de tal forma que el estado térmico superficial del suelo no supere los valores definidos por norma que se presentan posteriormente.

Respecto a lo comentado en el párrafo anterior, si se compara con un sistema convencional basado en un conjunto de radiadores, se requeriría una temperatura de impulsión del fluido de 70-90°C aproximadamente, lo cual supone una desventaja económica.

En el sistema de suelo radiante/refrescante, los tubos se sumergen en un manto de mortero de cemento y por encima va algún pavimento, ya sea parqué, baldosas cerámicas, etc. De esta manera se consigue que, en invierno, el cemento capte el calor del fluido que circula por los tubos y lo transmita al suelo, de tal forma que éste pueda emitir dicho calor al local moderadamente. En verano ocurre justo lo contrario, el ambiente se encuentra a mayor temperatura que el fluido, por lo que el ambiente cede energía al suelo, éste al mortero y finalmente le llega dicho calor al fluido, consiguiendo de esta manera refrigerar el recinto.

Los tubos se disponen a unos 3-5 centímetros por debajo del suelo, con una separación entre sí de unos 7-30 centímetros [19].

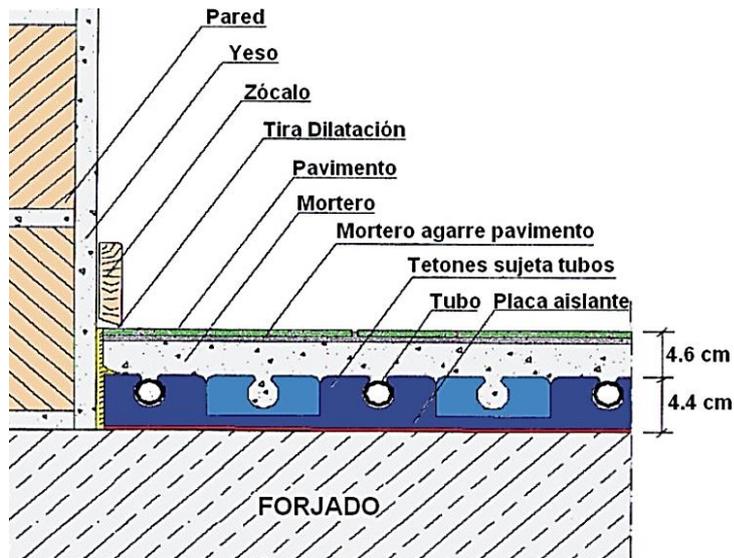


Figura 5.1: Vista transversal del suelo radiante. [WB10]

La composición de elementos de un sistema con suelo radiante/refrescante, como el representado en la *Figura 5.1*, es la siguiente:

- **Zócalo:** Su misión es mantener cierta separación entre la losa de cemento con respecto a las paredes del local. Se trata de un aislamiento que puede ser poliestireno expandido, poliuretano u otro elemento aislante.

En este proyecto se utiliza un zócalo de banda de espuma de polietileno con babero de plástico. Este permite que el mortero pueda dilatarse, reduciendo de esta forma las pérdidas. Además evita que el mortero pueda filtrarse entre el aislamiento del suelo y el perimetral.

- **Placa aislante:** Su tarea es impedir que el calor se escape hacia el forjado, evitando así un aumento de consumo. Se trata de un aislante que puede ser poliestireno expandido, lana de roca, poliuretano, PVC expandido, etc.

En este trabajo se emplean paneles aislantes SD 25/50 con una resistencia térmica de $0,75 \text{ m}^2 \text{ K/W}$.

- **Tubos:** Su objetivo es hacer circular el fluido caloportador a través de ellas. Los materiales más comunes son polietileno reticulado (PER o VPE), polibutileno (PB) y polipropileno copolímero (PP-c). Los diámetros más comunes son 12/16 mm y de 16/20 mm, el primer número indica el diámetro interior y el segundo número indica el diámetro exterior.

En este trabajo se usan tubos de polibutileno de 16/20 mm. Este tubo posee una barrera de oxígeno de EVOH (Etilen-Vinil-Alcohol).

- Tetones sujeta tubos: Su trabajo consiste en evitar el desplazamiento de los tubos.
- Mortero: Su labor es almacenar y emitir el calor (en verano absorberlo) que le llega de los fluidos. Está compuesto de mortero de cemento con un espesor mínimo de 30 milímetros.

Se emplea además un aditivo de mortero para que pueda mantener la fluidez durante más tiempo pudiendo disminuir el agua requerida y lograr así una mayor resistencia final.

- Pavimento: Se recomienda el uso de materiales cerámicos, aunque puede usarse cualquier otro, como parqué. Hay que tener en cuenta que la conductividad de los materiales es diferente y eso ocasionará una variación en el flujo de calor.

Se disponen baldosas cerámicas para el suelo en contacto con el terreno, es decir, para la Planta 0. Para las Plantas 1 y 2, se opta por parqué.

- Colector: Su misión es distribuir el fluido de la tubería general a cada uno de los circuitos emisores. Se realiza el equilibrio hidráulico de los circuitos y el control automático de la circulación del fluido por medio de válvulas y de actuadores electro térmicos.

En este proyecto, se cuenta con cinco colectores: uno de seis vías, tres de ocho vías y uno de diez vías. Posteriormente, se indica la ubicación de cada colector, así como que circuitos llevan asignados.

En cuanto a las ventajas de este sistema se puede señalar:

- Uniformidad: El sistema por suelo radiante es ideal ya que la temperatura se distribuye de manera uniforme. Es un sistema beneficioso debido a que permite calefactar el local desde la zona inferior para ir ascendiendo, al contrario que otros sistemas. De esta forma no se dan zonas calientes y zonas frías.
- Climatización sin movimiento de aire: el suelo radiante no origina ningún tipo de corriente de aire, sin embargo, los sistemas basados en calefacción por ventilconvectores ocasionan corrientes de aire que pueden ser molestas para los usuarios de la vivienda.
- Distribución de temperatura: El perfil óptimo de temperatura en invierno, mostrado en la *Figura 5.2*, es aquel que dispone mayor temperatura en los pies que en la cabeza. Esto es debido a que la

sensación de frío se origina, generalmente, a partir de la temperatura en los pies. Además una temperatura muy alta a cierta altura puede provocar cansancio y jaquecas. En la *Figura 5.2* se puede ver que el perfil de temperatura logrado con el suelo radiante se aproxima más al perfil de calefacción ideal que los otros sistemas.

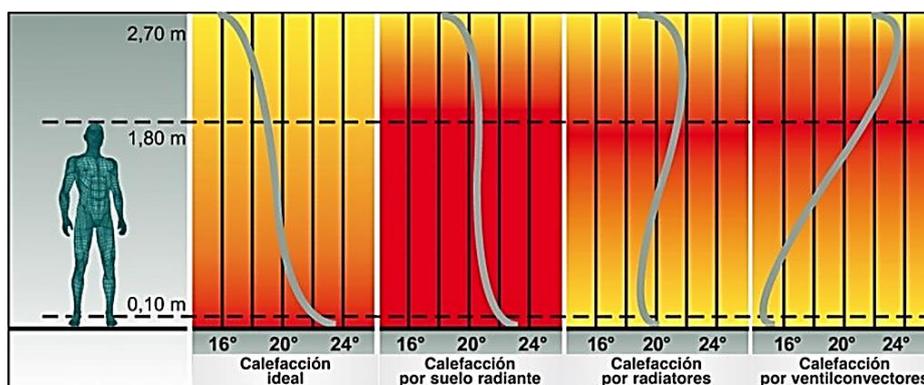


Figura 5.2: Perfiles de temperatura para distintos sistemas de calefacción. [WB11]

- Ahorro energético: Al existir una menor diferencia de temperatura entre el ambiente y el fluido caloportante, al contrario que en los sistemas convencionales, son menores las pérdidas energéticas. Además no se requieren grandes equipos que consigan elevar excesivamente la temperatura, pues como se dijo antes, la temperatura del fluido es moderada.
- Compatible con energías renovables: La mencionada temperatura moderada permite que pueda ser instalado con cualquier tipo de energía, incluso con las renovables. Debido a esto, en este proyecto, este sistema es idóneo para la energía geotérmica.
- Compatible con cualquier tipo de pavimento: Como se dijo anteriormente, este sistema puede usarse con cualquier tipo de pavimento, aunque hay que tener en cuenta que los materiales poseen diferentes conductividades.
- Bajo coste de mantenimiento: Si se compara con los sistemas con ventiladores, estos necesitan un determinado mantenimiento para asegurar la limpieza de los conductos, filtros, etc. Lo cual implica que se incrementen los costes.
- Estética: Al contrario que otros sistemas, el suelo radiante no se encuentra a la vista en el local. Lo cual implica una mejoría estética así como un mejor aprovechamiento del espacio.

- Sin ruido: Los sistemas con suelo radiante son totalmente silenciosos debido a la baja velocidad de circulación del fluido.

5.2. Dimensionamiento del suelo radiante

El dimensionamiento de suelo radiante se ha realizado a partir del software *Suelo Radiante* de Saunier Duval. Este programa efectúa el dimensionado del suelo mediante la Norma UNE-EN 15377-2:2009 [20].

5.2.1. Parámetros básicos

Temperatura superficial del suelo

La Norma *UNE-EN 1264:2009* [21], recomienda una temperatura superficial máxima de 29°C y una mínima de 19°C, en modo de calefacción. Para zonas periféricas se admite llegar hasta una temperatura superficial máxima de 35°C.

En modo de refrigeración, dicha Norma aconseja una temperatura superficial mínima de 20°C en caso de ocupación sedentaria y de 18°C en caso de tratarse de recintos con mayor actividad.

Diferencia de temperatura del medio de calefacción o refrigeración:

La diferencia de temperatura del medio de calefacción o refrigeración se expresa mediante la *Ecuación 5.1* [20]:

$$\Delta\theta_H = \frac{|\theta_V - \theta_R|}{\ln \frac{|\theta_V - \theta_i|}{|\theta_R - \theta_i|}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

θ_V es la temperatura de alimentación del medio de calefacción/refrigeración en K.

θ_R es la temperatura de retorno del medio de calefacción/refrigeración en K.

θ_i es la temperatura interior de diseño en K.

A partir del uso de este parámetro se tiene en cuenta el efecto de la caída de temperatura.

Paso entre tubos

Se denomina paso entre tubos a la distancia horizontal entre dos tubos consecutivos. El cálculo de este se puede realizar a partir del conocimiento de los valores de la diferencia de temperatura del medio de calefacción o refrigeración y de la potencia térmica calorífica del recinto mediante el uso del *Gráfico 5.1*.

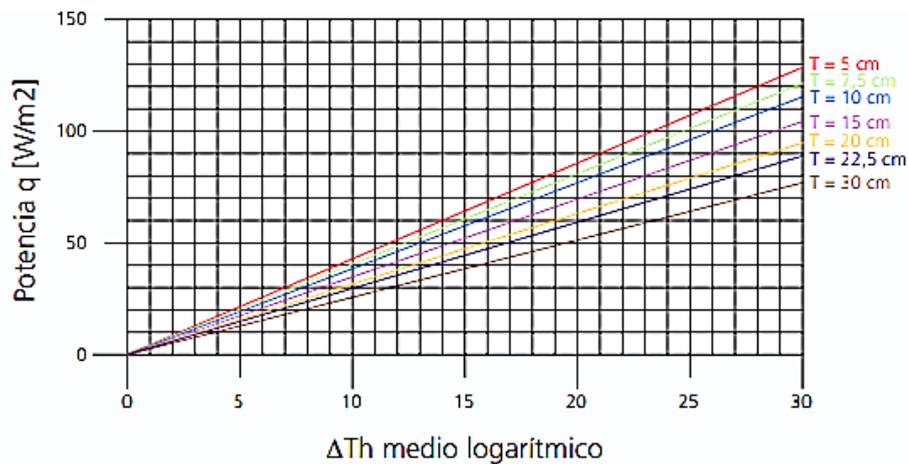


Gráfico 5.1: Cálculo del paso entre tubos. [WB12]

Coefficiente de transmisión de calor equivalente

El coeficiente equivalente de conductividad térmica hacia el local, en $W/m^2 K$, se refleja mediante la *Ecuación 5.2* [20]:

$$K_H = 1/(R_{HC} + R_i) \quad (Ec. 5.2)$$

Donde:

R_{HC} es la resistencia equivalente entre el medio de calefacción o refrigeración y un eje imaginario en la posición de los tubos, en $m^2 K/W$. Esta resistencia contiene la influencia del tipo de tubo, el paso entre los tubos y el método de instalación del tubo.

R_i es la resistencia térmica interna parcial de la estructura de la superficie en $m^2 K/W$.

Densidad de flujo térmico

La densidad de flujo térmico es proporcional a los dos parámetros anteriores y se calcula a partir de la *Ecuación 5.3* [20]:

$$q = K_H \cdot \Delta\theta_H \quad (Ec. 5.3)$$

5.2.2. Diseño

Transferencia de calor

La transferencia de calor de toda la superficie adaptada con perfiles de calefacción o refrigeración se expresa con la *Ecuación 5.4* [20]:

$$Q_F = q \cdot T \cdot L_R \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde:

q es la densidad de flujo térmico en W/m².

T es el paso entre tubos en m.

L_R es la longitud del tubo medida en metros. $L_R = \frac{A_F}{T}$, donde A_F es el área refrigerada o calefactada en m².

Caudal de diseño medio

Se procura que los caudales que circulan en modo de calefacción sean los mismos que los que circulan en modo de refrigeración debido a que así se ahorra el tener que realizar un ajuste de las válvulas de equilibrado.

El caudal de diseño del medio m_H de un circuito de calefacción o refrigeración se halla a partir de la *Ecuación 5.5* [20]:

$$m_H = \frac{A_F \cdot q}{\sigma \cdot c_W} \left(1 + \frac{R_0}{R_u} + \frac{\theta_i - \theta_u}{q \cdot R_u} \right) \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Donde:

A_F es el área refrigerada o calefactada en m².

q es la densidad de flujo térmico en W/m².

σ es la caída de temperatura en K.

c_W es la capacidad calorífica específica del agua. $c_W = 4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

R_0 es la resistencia térmica interna parcial de la estructura en m² K/W.

R_u es la resistencia térmica externa parcial de la estructura en m² K/W.

θ_i es la temperatura interior de diseño en K.

θ_u es la temperatura interior en el recinto adyacente en K.

5.2.3. Características del sistema de distribución de la vivienda

El sistema de distribución de la vivienda cuenta con un total de 1.181 metros de longitud de tubos de polibutileno.

Se dispone de un colector de ocho vías en la Planta 0 para distribuir el agua por la bodega, el cuarto de juegos, el distribuidor 0 y el cuarto de baño de dicha planta.

Se encuentran dos colectores en la Planta 1: uno de seis vías para abastecer los circuitos del dormitorio 3, el del cuarto de baño de dicha planta y el del distribuidor 1; y otro de ocho vías para suministrar el agua a la cocina, a los dos circuitos del salón y al hall.

En la Planta 2 se localizan dos colectores: uno de ocho vías para climatizar los dormitorios 1 y 2, el cuarto de baño 2 y el distribuidor 2; y otro de diez vías para proporcionar el agua a los dos circuitos del dormitorio principal y su cuarto de baño, y a los dos circuitos del despacho.

En la *Tabla 5.1*, se puede observar las temperaturas de impulsión y los caudales que circulan en la instalación.

Tabla 5.1: Temperaturas de impulsión y caudal total.

	Temperatura de impulsión (°C)	Caudal Total (l/min)
Calor	38,1	25,61
Frío	10,3	25,61

A continuación, en las *Tablas 5.2-5.21*, se muestran las características de los circuitos de cada recinto:

Planta 0

Tabla 5.2: Características del circuito de la bodega.

Longitud (m)	120	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	1,9
Dist. a colector (m)	3		Pérd. carga (m.c.a)	1,32	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		4,7		
Suelo Refrescante	17,4		5,2		

Tabla 5.3: Características del circuito del cuarto de juegos.

Longitud (m)	168	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	2,05
Dist. a colector (m)	2		Pérd. carga (m.c.a)	1,99	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,3		6,1		
Suelo Refrescante	17,9		6		

Tabla 5.4: Características del circuito del W.C. 0.

Longitud (m)	28	Paso (mm)	100	Caudal (l/min)	0,6
Dist. a colector (m)	4		Pérd. carga (m.c.a)	0,06	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	28,1		6		
Suelo Refrescante	20,1		4		

Tabla 5.5: Características del circuito del distribuidor 0.

Longitud (m)	15	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	0,1
Dist. a colector (m)	0		Pérd. carga (m.c.a)	0	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	21,2		6,7		
Suelo Refrescante	20,5		6		

Planta 1

Tabla 5.6: Características del circuito de la cocina.

Longitud (m)	48	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	1,71
Dist. a colector (m)	4		Pérd. carga (m.c.a)	0,47	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	23,1		5,1		
Suelo Refrescante	21,8		4,3		

Tabla 5.7: Características del circuito 1 del salón.

Longitud (m)	147	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	2,42
Dist. a colector (m)	3		Pérd. carga (m.c.a)	2,33	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	23,3		4		
Suelo Refrescante	18,8		5,1		

Tabla 5.8: Características del circuito 2 del salón.

Longitud (m)	58	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	1,89
Dist. a colector (m)	3		Pérd. carga (m.c.a)	0,67	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,7		3,1		
Suelo Refrescante	18,4		3		

Tabla 5.9: Características del circuito del hall.

Longitud (m)	32	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	0,17
Dist. a colector (m)	0		Pérd. carga (m.c.a)	0	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	20,9		4,9		
Suelo Refrescante	20,9		6		

Tabla 5.10: Características del circuito del dormitorio 3.

Longitud (m)	39	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	1,32
Dist. a colector (m)	2		Pérd. carga (m.c.a)	0,24	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		6		
Suelo Refrescante	22,7		4,1		

Tabla 5.11: Características del circuito del W.C. 1.

Longitud (m)	29	Paso (mm)	100	Caudal (l/min)	1,06
Dist. a colector (m)	4		Pérd. carga (m.c.a)		
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	27,7		3,3		
Suelo Refrescante	20,1		1,8		

Tabla 5.12: Características del circuito del distribuidor 1.

Longitud (m)	5	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	0,06
Dist. a colector (m)	2		Pérd. carga (m.c.a)	0	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	21,8		5,2		
Suelo Refrescante	20,9		6		

Planta 2

Tabla 5.13: Características del circuito del dormitorio 1.

Longitud (m)	46	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	1,55
Dist. a colector (m)	4		Pérd. carga (m.c.a)	0,39	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		5,9		
Suelo Refrescante	22,2		4,1		

Tabla 5.14: Características del circuito del dormitorio 2.

Longitud (m)	39	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	1,31
Dist. a colector (m)	7		Pérd. carga (m.c.a)	0,28	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		6		
Suelo Refrescante	22,1		4,4		

Tabla 5.15: Características del circuito 1 del dormitorio principal.

Longitud (m)	53	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	2,08
Dist. a colector (m)	5		Pérd. carga (m.c.a)	1,6	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		6		
Suelo Refrescante	24,1		6,8		

Tabla 5.16: Características del circuito 2 del dormitorio principal.

Longitud (m)	40	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	1,06
Dist. a colector (m)	5		Pérd. carga (m.c.a)	0,82	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	24,5		6		
Suelo Refrescante	24,1		6,8		

Tabla 5.17: Características del circuito del W.C. principal.

Longitud (m)	55	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	2,12
Dist. a colector (m)	9		Pérd. carga (m.c.a)	0,94	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	27,5		3,3		
Suelo Refrescante	21,1		1,6		

Tabla 5.18: Características del circuito del W.C. 2.

Longitud (m)	33	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	1,77
Dist. a colector (m)	5		Pérd. carga (m.c.a)	0,41	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	26,7		3		
Suelo Refrescante	24,6		0,6		

Tabla 5.19: Características del circuito 1 del despacho.

Longitud (m)	36	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	1,12
Dist. a colector (m)	1		Pérd. carga (m.c.a)	0,50	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	23,9		2,5		
Suelo Refrescante	18,2		3		

Tabla 5.20: Características del circuito 2 del despacho.

Longitud (m)	35	Paso (mm)	200	Caudal (l/min)	1,05
Dist. a colector (m)	1		Pérd. carga (m.c.a)	0,47	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	23,9		2,5		
Suelo Refrescante	18,2		3		

Tabla 5.21: Características del circuito del distribuidor 2.

Longitud (m)	28	Paso (mm)	300	Caudal (l/min)	0,27
Dist. a colector (m)	0		Pérd. carga (m.c.a)	0,01	
Suelo	Tª Suelo (°C)		Salto térmico (°C)		
Suelo radiante	20,7		2,9		
Suelo Refrescante	20,9		6,0		

5.3. Distribución del suelo radiante

Seguidamente, en la *Figura 5.3*, *Figura 5.4* y *Figura 5.5*, se muestra la distribución de los diferentes circuitos de cada local en la Planta 0, 1 y 2 respectivamente. Los planos están a escala 1:100.

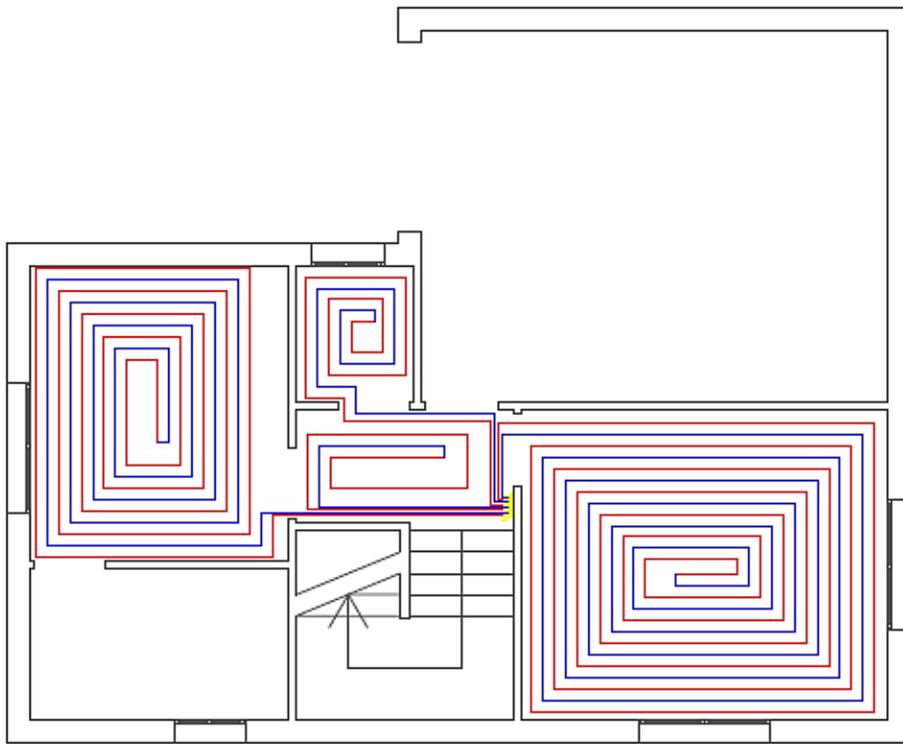


Figura 5.3: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 0.

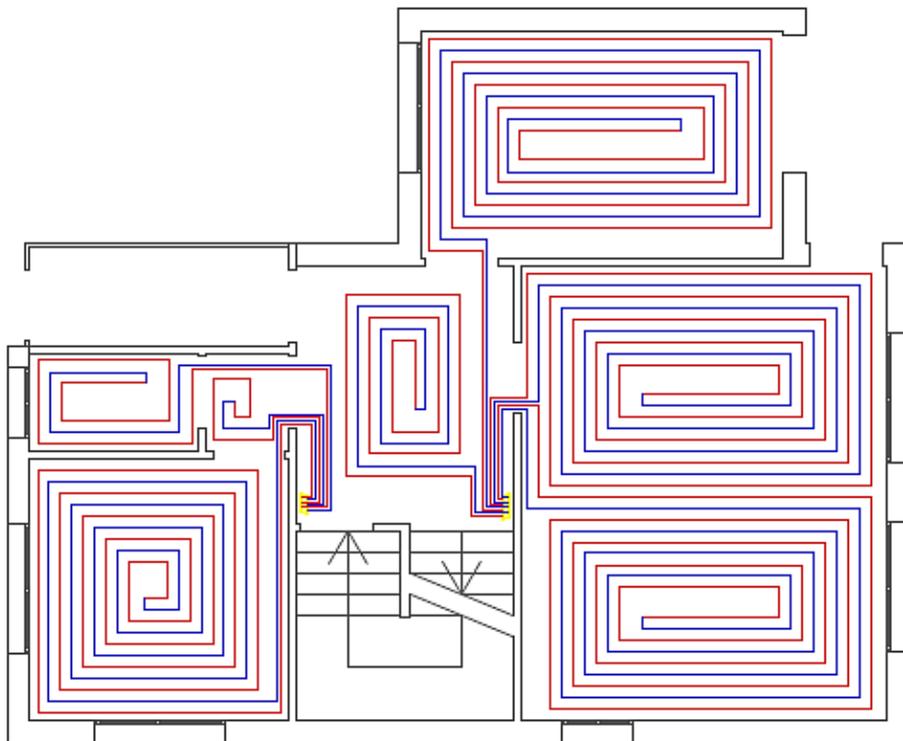


Figura 5.4: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 1.

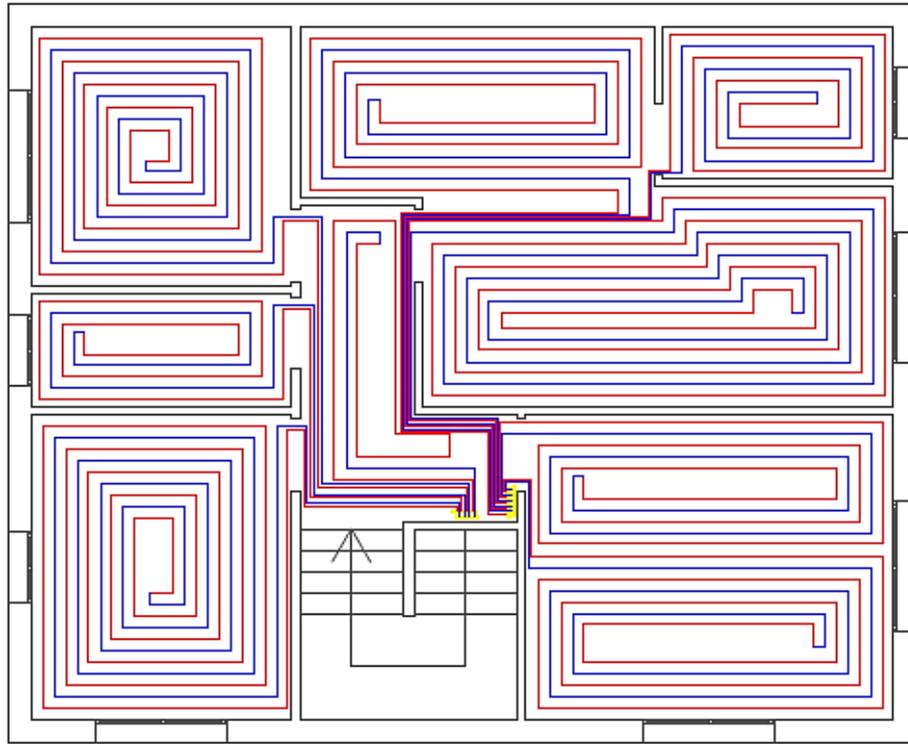


Figura 5.5: Distribución de circuitos del suelo radiante en la Planta 2.

CAPÍTULO VI: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para cubrir la demanda térmica de la vivienda se dispone de una bomba de calor geotérmica, basada en un sistema suelo/agua, cuyas características técnicas se muestran a continuación. En este capítulo se describe el funcionamiento de las bombas de calor en general, así como los parámetros de funcionamiento a tener en cuenta. Además, se presenta el fluido refrigerante seleccionado apropiado a la bomba de calor geotérmica escogida.

6.1. Introducción

En condiciones normales el calor se cede desde un punto caliente a un punto frío hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Una bomba de calor es un dispositivo que transfiere el calor de un foco frío a un foco caliente. Para lograr que el foco caliente capte ese calor del foco frío y no oponerse al segundo principio de la termodinámica, se requiere proporcionar cierta cantidad de energía a la bomba de calor, usualmente energía mecánica al compresor (se suele usar un motor eléctrico).

Por lo tanto, la ventaja del uso de bombas de calor en vez de otras técnicas, reside en que son capaces de aprovechar la energía que se encuentra en el ambiente, ya sea aire, agua o terreno, para uso de climatización de áreas interiores a partir del aporte de una pequeña cantidad de energía eléctrica.

Las bombas de calor también son capaces de funcionar en modo de refrigeración de tal forma que existe una transferencia de calor desde el interior de un recinto, que actúa como foco frío, hacia el ambiente, que actúa como foco caliente.

A una bomba de calor geotérmica le entra el fluido que circula por el sistema de captación localizado en el terreno y el fluido que recorre los circuitos ubicados en la vivienda.

El objetivo de las aplicaciones geotérmicas de muy baja entalpía se basa en extraer calor del terreno de modo que se caliente un fluido de alta compresibilidad y bajo punto de vaporización para transmitir dicho calor al local.

El calor puede repartirse por el recinto a partir de suelo radiante, radiadores o por aire climatizado. Los intercambiadores de calor situados en el terreno llevan en su interior agua glicolada.

Las bombas de calor geotérmicas tienen mayor rendimiento que las bombas de calor de aire ya que trabajan mejor por la poca variación que existe en la temperatura del subsuelo. Asimismo, el agua traslada y reparte el calor mejor que el aire [11].

6.2. Tipos de bombas de calor geotérmicas [11]

6.2.1. Según el tipo de fuente de calor y el fluido de distribución local

En esta clasificación se hacen dos distinciones. Primero, en función del tipo de fuente de calor externo. Segundo, en función de la clase de fluido que circula por el sistema de distribución interior del recinto.

Según el tipo de fuente de calor externo:

- Suelo: El calor se aprovecha del subsuelo a partir de colectores que llevan en su interior un fluido.
- Agua: Se da cuando hay presencia próxima de alguna fuente que contenga agua, por ejemplo un lago, río o pozo. En este caso los colectores están en contacto con dicha agua.

Según el tipo de fluido que circula por el sistema de distribución interior del recinto:

- Aire: Cuando se climatiza el recinto por aire.
- Agua: Cuando se realiza climatiza el recinto a partir de suelo radiante o radiadores.

6.2.2. Según la distribución de la captación

Según el tipo de sistema, existen:

- Sistemas abiertos: están relacionados con fuentes subterráneas de agua. Se componen de un pozo de extracción y otro de inyección con cierta distancia entre ellos.
- Sistemas cerrados: están compuestos por bucles cerrados de colectores.

Además, según la colocación de los colectores en el suelo, la clasificación es:

- Horizontales: Se encuentran dispuestos de forma horizontal a una profundidad de 1 metro, aproximadamente, bajo el suelo. Existen varias configuraciones de estos: conexión en serie o en paralelo, colectores paralelos en zanja, colectores de tubería, en espiral horizontal o en espiral vertical.

- Verticales: Su disposición en este caso es vertical, llegando a profundidades del orden de 150 metros, muy superiores a las de los horizontales.

6.2.3. Según la ubicación del evaporador

Habitualmente, la bomba de calor geotérmica se dispone dentro del recinto, donde también se encuentra el evaporador y el condensador.

Una particularidad de esta instalación es que el propio sistema de colectores actúe como evaporador, se conoce como máquinas de expansión directa.

6.2.4. Según la energía de compresión

Se distinguen dos tipos:

- Compresión: La compresión se realiza por medio de un compresor que es movido por un motor. Dentro de esta clasificación, se puede distinguir aquellos en los que el motor es de combustión interna o aquellos en los que el motor es eléctrico.
- Absorción: En este caso las bombas de calor de absorción no son accionadas mecánicamente como en el caso anterior, sino que se accionan por medio de una aportación de energía térmica al ciclo.

6.3. Descripción de los componentes de la bomba de calor

6.3.1. Introducción

Una bomba de calor está compuesta principalmente por: un evaporador, un compresor, un condensador y una válvula de expansión. En la *Figura 6.1* se pueden observar dichos componentes.

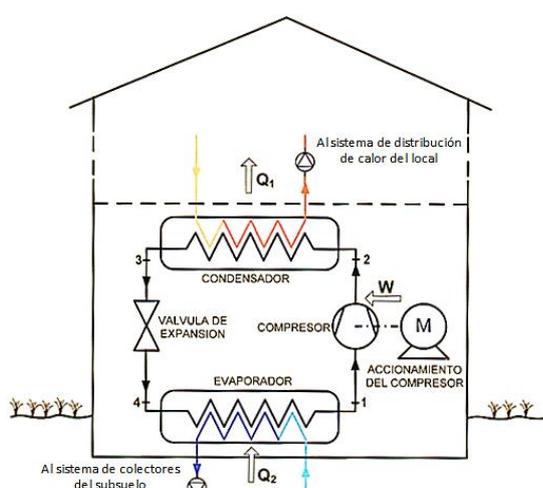


Figura 6.1: Componentes de una bomba de calor geotérmica. [WB4]

En la *Figura 6.1*, la bomba de calor está trabajando en modo de calefacción. La bomba funciona como un ciclo cerrado por el que circula un fluido refrigerante que va variando su estado según pasa por los diferentes componentes.

6.3.2. Compresor

El compresor es un dispositivo que es movido por medio de un motor. Al comienzo del ciclo, punto 1 de la *Figura 6.1*, el fluido se encuentra en estado de vapor saturado. El compresor provoca que el fluido aumente su presión, temperatura y contenido energético pasando al punto 2.

6.3.3. Condensador

El condensador es un intercambiador de calor en cual el fluido caloportador transfiere su energía, a presión constante, en forma de calor al fluido del sistema de distribución de climatización. En primer lugar, el fluido en estado de vapor sobrecalentado, al atravesar el condensador, cede calor sensible perdiendo temperatura. Posteriormente, cede calor latente a presión y temperatura constante. Finalmente, en el punto 3, el fluido se encuentra en estado líquido sobrecalentado.

6.3.4. Válvula de expansión

El fluido al atravesar la válvula de expansión, experimenta una expansión adiabática que reduce su presión de tal forma que también disminuye bruscamente su temperatura hasta llegar al punto 4, en el cual, el fluido se encuentra en un estado intermedio entre vapor y líquido, principalmente este último.

6.3.5. Evaporador

El evaporador es un intercambiador de calor en cual el fluido refrigerante capta el calor, a baja presión y temperatura, que le aporta el fluido que circula por el sistema de captación localizado en el terreno. De esta manera se pasa del punto 4 al punto 1, donde vuelve a encontrarse en estado de vapor saturado y se reinicia el ciclo.

6.3.6. Instrumentación y control

Para asegurarse de que el sistema trabaje adecuadamente, se han de tener una serie de elementos de instrumentación y control. Estos elementos se encargan de actuar sobre el sistema en función de datos de entrada. Ejemplos de estos equipos pueden ser los medidores de temperatura y de presión.

6.3.7. Otros componentes

Existen más componentes que los descritos anteriormente. Estos pueden ser: calderín, filtro deshidratador, visores de líquido, silenciadores, separadores de líquido y aceite, intercambiadores de calor y numerosas válvulas.

6.4. Fundamentos físicos de la bomba de calor

6.4.1. Introducción

En modo de calefacción, el fluido caloportador capta el calor \dot{Q}_2 que es aprovechado del suelo a una temperatura T_2 . Posteriormente, mediante el compresor, accionado a partir de un aporte de energía, se aumenta la temperatura del refrigerante hasta T_1 . De esta forma, el calor \dot{Q}_1 que se transfiere al recinto es superior que el que se ha aprovechado del suelo.

En modo de refrigeración ocurre justo lo contrario, el fluido refrigerante absorbe el calor \dot{Q}_2 que es extraído del recinto a una temperatura T_2 . Posteriormente, mediante el compresor, se aumenta la temperatura del fluido caloportador hasta T_1 . De esta forma, el calor \dot{Q}_1 que se cede al terreno es mayor que el que se ha extraído del recinto [22]. En la *Figura 6.2* se muestran ambos modos.

De esta manera se cumple la *Ecuación 6.1* [11].

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{W} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

A vistas de la *Ecuación 6.1* parece que es favorable que el trabajo sea lo más alto posible, sin embargo, el objetivo que se busca es tratar de sacar el mayor provecho a \dot{Q}_2 y que \dot{W} sea lo mínimo posible para abaratar costes.

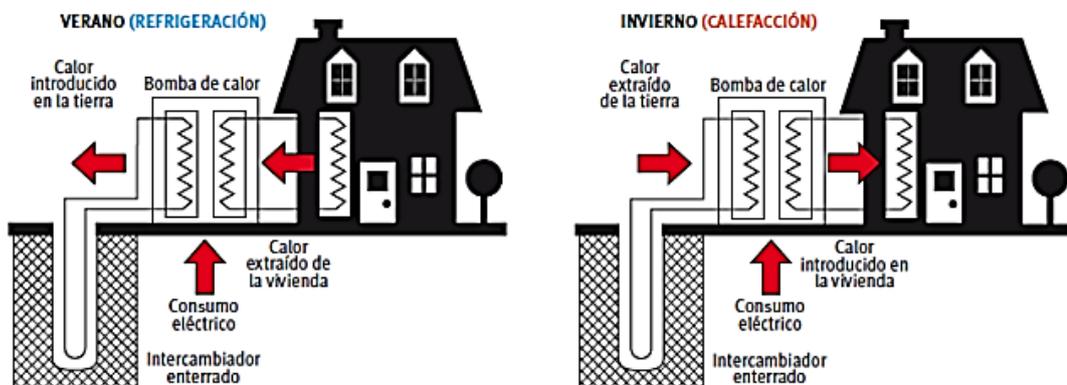


Figura 6.2: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica. [WB4]

Se ha de procurar que la temperatura que se extrae T_2 sea superior a la que circula por el evaporador T_{r2} y, a su vez, que la temperatura que se aporta T_1 sea inferior que la que circula por el condensador T_{r1} .

La función principal del compresor y de la válvula de expansión es alcanzar las presiones en el evaporador y en el condensador que permitan los cambios de fase a las temperaturas T_{r2} y T_{r1} , respectivamente. Esto se debe a que la captación o cesión del calor del fluido se realiza gracias a su cambio de fase.

6.4.2. Parámetros de operación ideales

En este apartado se estudia el funcionamiento de una máquina de ciclo ideal. En la *Figura 6.3*, se puede observar un esquema representativo de una máquina que sigue un ciclo de Carnot inverso, así como su diagrama T-s.

El ciclo de Carnot es un ciclo ideal en el que se considera que no existen pérdidas y que los procesos son reversibles. Es el ciclo seguido por una máquina que funciona con el máximo rendimiento y entre dos focos: uno frío a una temperatura T_2 y uno caliente a una temperatura T_1 [11].

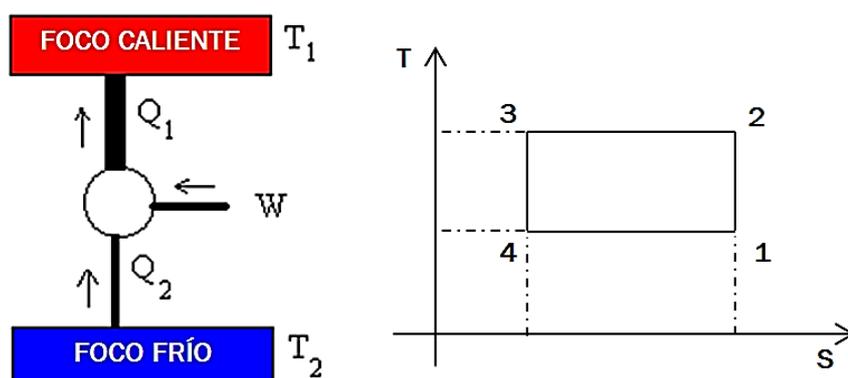


Figura 6.3: Máquina de refrigeración ideal de Carnot. Fuente: IDAE modificado.

En el diagrama T-s de la *Figura 6.3*, el calor \dot{Q}_1 es el área encerrada bajo la línea que va del punto 2 al punto 3 y el eje s, y el calor \dot{Q}_2 es el área encerrada bajo la línea que va del punto 1 al punto 4 y el eje s.

El rendimiento se calcula a partir del cociente de lo alcanzado y de lo que necesitamos para lograrlo.

De esta manera, para cuando la bomba de calor trabaja en modo calefacción, existe un parámetro que la caracteriza: el Coeficiente de Operación o COP, según sus iniciales en inglés Coefficient Of Performance. Este parámetro está definido por la *Ecuación 6.2* [11].

$$COP_{ideal} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2} = \frac{T_1 \cdot \Delta s}{T_1 \cdot \Delta s - T_2 \cdot \Delta s} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (Ec. 6.2)$$

De la *Ecuación 6.2* se puede deducir que lo beneficioso es que el salto térmico sea pequeño. El valor del COP suele rondar valores muy superiores a 1. Usualmente se obtiene un COP entre 3 y 4 [10], pudiendo llegar a 5 o más, lo que significaría que tan sólo una quinta parte del calor que se proporciona al recinto proviene del trabajo del compresor.

Si la bomba de calor trabaja en modo refrigeración, existe otro parámetro diferente que la caracteriza: el Coeficiente de Eficiencia Energética o EER, según sus iniciales en inglés Energy Efficiency Ratio. Este parámetro se halla mediante la *Ecuación 6.3* [11].

$$EER_{ideal} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2} = \frac{T_2 \cdot \Delta s}{T_1 \cdot \Delta s - T_2 \cdot \Delta s} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (Ec. 6.3)$$

De la *Ecuación 6.3* se deduce que lo beneficioso es que el salto térmico sea pequeño. El valor del EER también suele rondar valores muy superiores a 1. Usualmente se obtiene un EER entre 2,5 y 3,5 [10], pudiendo llegar a 4 o más, lo que significaría que tan sólo una cuarta parte del calor que se absorbe del recinto proviene del trabajo del compresor.

Ambos parámetros se relacionan a partir de la *Ecuación 6.4* [11].

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} + \frac{\dot{W}}{\dot{W}} \rightarrow COP_{ideal} = EER_{ideal} + 1 \quad (Ec. 6.4)$$

6.4.3. Parámetros de operación teóricos

Teóricamente, las bombas de calor no son capaces de trabajar en ciclos ideales. Es por ello que el diagrama mostrado en la *Figura 6.4* se aleja al visto en el anterior apartado. La campana que aparece en el diagrama representa el límite a partir del cual el fluido está en estado líquido o vapor: dentro de la campana, parte del fluido se encuentra en estado líquido y otra parte en estado de vapor; a la izquierda de la campana, el fluido se haya en estado líquido; y a la derecha de la campana, el fluido se encuentra en estado de vapor [11].

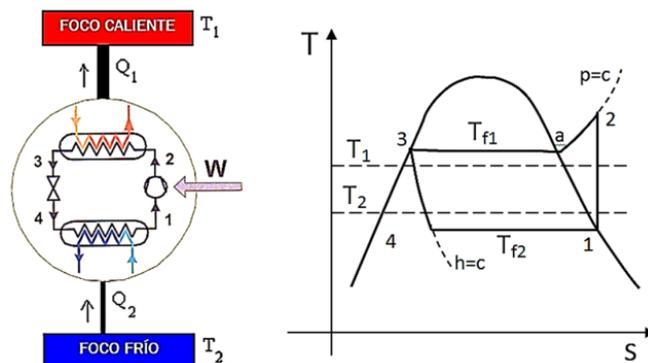


Figura 6.4: Bomba de calor y diagrama T – s teórico. Fuente: IDAE modificado.

Se puede observar que la temperatura del fluido refrigerante que circula por el evaporador y el condensador, T_{f2} y T_{f1} , respectivamente, no coinciden con las temperaturas del foco caliente y del foco frío.

Por lo tanto, se obtienen unos parámetros de operación teóricos diferentes a los parámetros de operación ideales vistos anteriormente dados por la Ecuación 6.5 y la Ecuación 6.6 [11].

$$COP_{teórico} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2} \approx \frac{T_{f1} \cdot \Delta s}{T_{f1} \cdot \Delta s - T_{f2} \cdot \Delta s} = \frac{T_{f1}}{T_{f1} - T_{f2}} \quad (Ec. 6.5)$$

$$EER_{teórico} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2} \approx \frac{T_{f2} \cdot \Delta s}{T_{f1} \cdot \Delta s - T_{f2} \cdot \Delta s} = \frac{T_{f2}}{T_{f1} - T_{f2}} \quad (Ec. 6.6)$$

Como se aprecia en la Figura 6.4, el salto térmico ahora es superior al visto en el ciclo ideal por lo que los parámetros serán inferiores.

6.4.4. Parámetros de operación reales

En este apartado se exhibe que se producen aún más variaciones con respecto al ciclo ideal. El diagrama de la izquierda de la Figura 6.5 muestra un diagrama P-h de un ciclo teórico y en el diagrama de la derecha se presenta para un ciclo real.

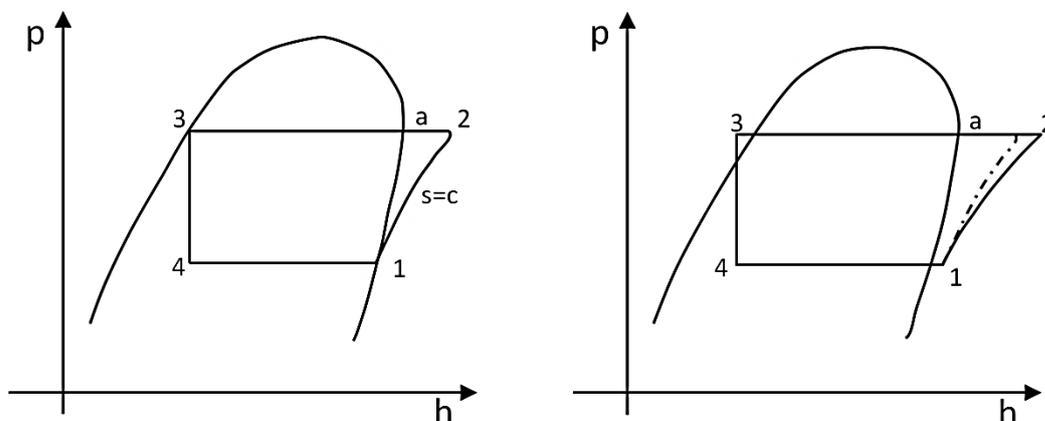


Figura 6.5: Diagrama p-h teórico y real de una bomba de calor. [WB4]

La desviación del punto 1 hacia la derecha se debe a que el fluido al atravesar el evaporador debe vaporizarse de tal forma que se asegure que no pase nada de líquido por el compresor.

La desviación del punto 2 se debe a que en el compresor se producen ciertas pérdidas que origina que se le aplique una cantidad superior de energía al compresor para compensarlo.

La desviación del punto 3 hacia la izquierda se debe a que el fluido, una vez haya atravesado el condensador, se tiene que encontrar libre de burbujas de vapor que entorpecerían el paso del fluido por la válvula de expansión.

Por lo tanto, se obtienen unos parámetros de operación reales dados por la *Ecuación 6.7* y la *Ecuación 6.8* [11].

$$COP_{real} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} \approx \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \alpha \cdot \frac{T_{f1}}{T_{f1} - T_{f2}} \quad (Ec. 6.7)$$

$$EER_{real} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} \approx \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \alpha \cdot \frac{T_{f2}}{T_{f1} - T_{f2}} \quad (Ec. 6.8)$$

6.4.5. Parámetros de operación globales

En las ecuaciones previas, se ha supuesto que el rendimiento del compresor es del 100%, pero eso en la realidad no se cumple. Por lo tanto, se obtienen unos parámetros de operación globales dados por la *Ecuación 6.9* y la *Ecuación 6.10* [11].

$$COP_{global} = COP \cdot \eta_{compresor} \quad (Ec. 6.9)$$

$$EER_{global} = EER \cdot \eta_{compresor} \quad (Ec. 6.10)$$

6.4.6. Parámetros de operación medios estacionales

Los parámetros operativos que proporcionan los fabricantes están dados para unas condiciones nominales. Sin embargo, la selección de las bombas de calor geotérmicas se ha de realizar en función de las condiciones exteriores más desfavorables tanto para calor como para frío. Durante las estaciones, las condiciones exteriores fluctúan así como las condiciones exigidas en el recinto. Por ello, se definen unos parámetros de operación medios estacionales dados por la *Ecuación 6.11* y la *Ecuación 6.12* [11].

$$COP_{spf} = \frac{Q_1}{W} \quad (Ec. 6.11); \quad EER_{spf} = \frac{Q_2}{W} \quad (Ec. 6.12)$$

Donde:

Q_1 es el calor total aportado a lo largo de un período determinado en J.

Q_2 es el calor total extraído a lo largo de un período determinado en J.

W es el trabajo de los sistemas auxiliares del equipo en J.

SPF es el coeficiente medio estacional, o Seasonal Performance Factor en inglés.

6.4.7. Reversibilidad de la bomba de calor

Como se ha mencionado anteriormente, la bomba de calor puede ser empleada tanto para producir frío en verano como calor en invierno.

El intercambiador del fluido refrigerante con el fluido del sistema de distribución del recinto, en invierno actúa como condensador mientras que en verano funciona como evaporador. Pasa lo mismo con el intercambiador del fluido caloportador con el fluido del sistema de captación situado en el terreno, en invierno funciona como evaporador mientras que en verano actúa como condensador.

Para lograr este efecto se dispone de una válvula inversora de cuatro vías como la presentada en la *Figura 6.6*. Esta válvula guía el fluido por los intercambiadores según el modo en el que esté trabajando la bomba de calor. Se puede observar que el fluido siempre entra por el mismo lugar al compresor, consiguiendo así que siempre aumente la presión [11].

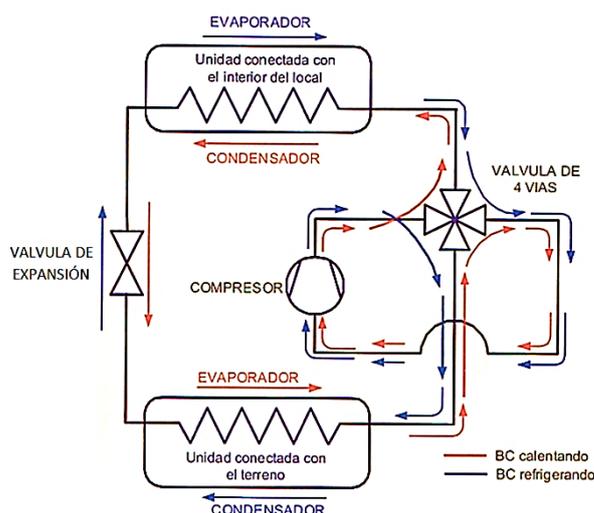


Figura 6.6: Reversibilidad de la bomba de calor por medio de una válvula de cuatro vías. [WB4]

En la *Figura 6.6*, se observa cómo queda el circuito con la incorporación de la válvula inversora y también el recorrido del fluido en función del modo en que esté trabajando la bomba de calor: para calefacción o refrigeración.

6.5. Selección de la bomba de calor

Para seleccionar la bomba de calor se requieren las cargas térmicas de calefacción y refrigeración calculadas en el *Capítulo IV*.

A partir de éstas se selecciona la bomba de calor geotérmica ECOFOREST ECOGEO C3 3-12 kW monofásica que suministra tanto calor como frío activo. Se compone por un evaporador, un compresor, un condensador y una válvula

de expansión electrónica por los que se mueve el fluido refrigerante R-410a. En modo de calefacción, el calor se absorbe del subsuelo mediante la entrada del refrigerante por el evaporador y se transfiere a la vivienda a partir del condensador. La BCG incluye un depósito de acumulación de ACS de 170 litros con una capacidad de producción rápida y a un pequeño coste económico.

La bomba de calor geotérmica posee un compresor Scroll con tecnología Inverter, lo cual posibilita adecuarlo a las demandas de calefacción y refrigeración de la vivienda, impidiendo que trabaje en todo-nada. Esto disminuye el consumo eléctrico e incrementa la vida de la bomba.

Esta contiene además bombas de circulación de velocidad variable y alta eficiencia de clase energética A, que regulan su velocidad en función de las necesidades de calor y frío de la vivienda. La válvula de expansión electrónica y recuperación del calor generado en el Inverter, aumenta el COP de la bomba de calor.

En la *Figura 6.7* se presenta la bomba de calor vista desde el exterior así como el esquema de funcionamiento que se da en su interior.

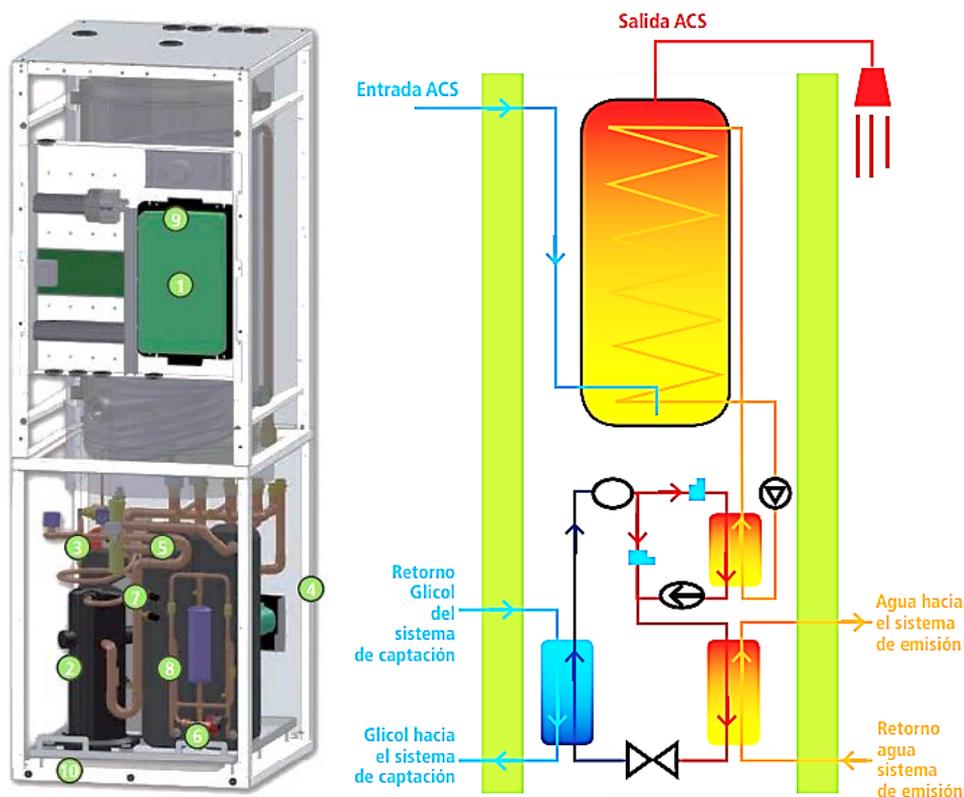


Figura 6.7: Bomba de calor ECOGEO C3 3-12 kW. [WB13]

Las características técnicas se muestran en la *Tabla 6.1*.

Tabla 6.1: Características técnicas de la bomba de calor geotérmica ECOGEO C3 3-12 kW. [WB13]

Componentes	Compresor	Scroll con Inverter de Copeland
	Válvula de expansión	Electrónica Carel
	Intercambiadores	Placas Alfa Laval
	Bombas recirculadoras	Velocidad variable de alta eficiencia Wilo
	Acumulador ACS con serpentín	De acero inoxidable (INOX316)
	Vasos de expansión integrados	Circuito de calefacción y circuito de captación
Datos eléctricos	Tensión de alimentación	230 V/50 Hz,1/N/PE~
	Protección magnetotérmica (A)	32
Eficiencia	Potencia calorífica ¹ (kW)	3-15
	Potencia calorífica ² (kW)	3-14
	Consumo eléctrico ² (kW)	0,7-3,2
	COP ²	4,6-5
	EER ²	6,1-6,9
	Potencia frigorífica ³ (kW)	4-16,3
Circuito frigorífico	Carga refrigerante (kg)	1,5
	Presión funcionamiento máxima (bar)	42
	Tipo aceite compresor	POE
	Carga aceite compresor (kg)	2
	Temperaturas máxima/mínima	60/20
Circuito calefacción	Presión funcionamiento máxima (bar)	3
	Caudal nominal (l/h)	1.200-4.500
	Temperaturas máxima/mínima	20/-10
Circuito captación	Presión captadores (bar)	3
	Caudal nominal (l/h)	1.200-4.500
	Volumen acumulador ACS (l)	170
ACS	Presión funcionamiento máxima (bar)	8
	Temperatura máxima sin apoyo (°C)	55
	Temperatura máxima con apoyo (°C)	75
	Nivel emisión sonora (dB)	42
Dimensiones	Alto x ancho x fondo (mm)	1.800x600x700
Peso	Peso en vacío (kg)	260

1) Conforme a EN 14511 [23], 5/2 - 30/35 °C, incluyendo bombas de circulación.

2) Conforme a EN 14511 [23], 0/-3 - 30/35 °C, incluyendo bombas de circulación.

3) Conforme a EN 14511 [23], 7/12 - 30/35 °C, incluyendo bombas de circulación.

6.5.1. Cumplimiento del dimensionado de ACS

Se establece la demanda de referencia de agua caliente sanitaria para 60°C a partir de la *Tabla 6.2* [24].

Tabla 6.2: Demanda de ACS. [24]

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60°C	
Vivienda unifamiliares	30	Por persona
Vivienda multifamiliares	22	Por persona
Hospitales y clínicas	55	Por cama
Hotel ****	70	Por cama
Hotel ***	55	Por cama
Hotel/Hostal **	40	Por cama
Camping	40	Por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	Por cama
Residencia	55	Por cama
Vestuarios/Duchas	15	Por servicio
Escuelas	3	Por alumno
Cuarteles	20	Por persona
Fábricas y talleres	15	Por persona
Administrativos	3	Por persona
Gimnasios	20 a 25	Por usuario
Lavanderías	3 a 5	Por kilogramo de ropa
Restaurantes	5 a 10	Por comida
Cafeterías	1	Por almuerzo

Como se puede ver en *Tabla 6.2*, el proyecto, al tratarse de una vivienda unifamiliar, requiere 30 litros de agua caliente sanitaria al día por cada persona que resida en dicha vivienda. Al haber cuatro habitantes, se necesita un total de 120 litros de agua caliente sanitaria por día. El acumulador de ACS de la bomba ECOGEO C3 3-12 kW dispone de 170 litros por lo que se cubre la demanda de agua caliente sanitaria.

6.5.2. Horario de funcionamiento

El cálculo de horas anuales en las que va a trabajar la bomba de calor geotérmica se realiza a partir del cuadro 2 de la “DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 1 de marzo de 2013” [25].

En este cuadro se indica el número de horas de funcionamiento en calefacción recomendado para la bomba de calor geotérmica. Como se puede observar en el cuadro, dicho número de horas son 2.070 horas al año dado que la localización de la vivienda se encuentra en una condición climática de clima medio.

A este número de horas hay que añadirle el tiempo empleado, a lo largo del año, por la BCG en producir ACS. Para ello, se ha de calcular la cantidad de agua, a 60°C, que se necesita producir a lo largo del año. Se ha visto en el apartado anterior que se requieren 120 litros al día.

Posteriormente, se calcula el tiempo que debe estar funcionando la bomba de calor geotérmica a la potencia nominal para calentarla desde la temperatura de red [26], que tiene una temperatura mínima de 10°C y una máxima de 20°C, hasta los 60°C. Para hallar dicho tiempo de funcionamiento se hace uso de la *Ecuación 6.13* [27].

$$Q = G \cdot C_e \cdot (T_{ACS} - T_{red}) \quad (Ec. 6.13)$$

Donde:

Q es la potencia nominal en W.

G es el volumen de agua caliente sanitaria necesaria en l/s.

C_e es el calor específico del agua. Su valor es de 4.186 J/kg °C.

T_{ACS} es la temperatura del agua caliente sanitaria en °C.

T_{red} es la temperatura del agua de la red en °C.

Operando, se obtiene un total de 280 horas anuales para calentar el ACS.

Además, se ha de añadir el número de horas anuales en las que va a funcionar la bomba de calor geotérmica en modo de refrigeración. Estas son del orden de 500 horas anuales.

Finalmente, la cantidad de horas anuales en las que funciona la bomba de calor geotérmica es de 2.850 horas.

6.5.3. Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor

La Directiva 2009/28/CE [28], detalla que la cantidad de energía absorbida por bombas de calor, considerada energía procedente de fuentes renovables (ERES), se calcula a partir de la *Ecuación 6.14* [29].

$$ERES = Q_{usable} \cdot \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (Ec. 6.14)$$

Donde:

Q_{usable} es el calor útil total estimado por bombas de calor.

SPF es el factor de rendimiento medio estacional estimativo para dichas bombas de calor.

A continuación se indica cómo calcular cada uno de los términos.

Calor útil total estimado por bombas de calor

El calor útil total estimado proporcionado por bombas de calor se halla a partir de la *Ecuación 6.15* [25].

$$Q_{usable} = H_{HP} \cdot P_{rated} \quad (Ec. 6.15)$$

Donde:

H_{HP} horas equivalentes de funcionamiento a plena carga.

P_{rated} potencia de las bombas de calor instaladas en kW.

Por lo tanto, en el caso de este proyecto, el calor útil es:

$$Q_{usable_{calefacción}} = 2350 \cdot 12 = 28.200 \text{ kWh}$$

$$Q_{usable_{refrigeración}} = 500 \cdot 12 = 6.000 \text{ kWh}$$

Factor de rendimiento medio estacional

Modo de calefacción

El factor de rendimiento medio estacional estimativo para bombas de calor en modo de calefacción se obtiene mediante la *Ecuación 6.16* [29].

$$SPF = COP_{nominal} \cdot FP \cdot FC \quad (Ec. 6.16)$$

Donde:

FP es un factor de ponderación cuyos valores dependen de la zona climática en España.

FC es un factor de corrección cuyos valores dependen de la temperatura de distribución y de la temperatura a la cual se ha obtenido el $COP_{nominal}$.

Los valores se obtienen del documento reconocido de la Calificación Energética “Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas” [30]. En este, se muestran los parámetros con valores que se encuentran del lado de la seguridad.

Según la *Tabla 4.1* y la *Tabla 4.2* del documento mencionado anteriormente, se tiene un $FP = 1,11$ y un $FC = 0,9$ [30].

Por lo tanto, en el caso de este proyecto, el factor de rendimiento estacional en modo de calefacción es:

$$SPF = 4,8 \cdot 1,11 \cdot 0,9 = 4,795$$

Modo de refrigeración

El factor de rendimiento medio estacional estimativo para bombas de calor en modo de refrigeración se expresa con la *Ecuación 6.17* [29].

$$SPF = EER_{nominal} \cdot FP \cdot FC \quad (Ec. 6.17)$$

En este caso, se tiene un $FP = 1,415$ y un $FC = 1,1$ [30].

Por lo tanto, en el caso de este proyecto, el factor de rendimiento estacional en modo de refrigeración es:

$$SPF = 6,1 \cdot 1,415 \cdot 1,1 = 9,49$$

Finalmente, se tiene:

$$ERES_{total} = 27.687,184 \text{ kWh}$$

6.5.4. Elección del fluido refrigerante y cálculo del TEWI de la instalación

El refrigerante que se usa en la bomba de calor geotérmica seleccionada es el R-410a.

El R-410a es una mezcla cuasi-azeotrópica formada por los fluidos refrigerantes HFC's: R-32 (50%) y R-125 (50%), con un índice de destrucción del ozono igual a cero. Este refrigerante es muy semejante al R-22.

Sus características vienen reflejadas en la *Tabla 6.3*.

Tabla 6.3: Características del R-410a. [WB14]

Peso molecular	(g/mol)	72,6
Temperatura de ebullición a 1,013 bar	(°C)	-52,2
Temperatura crítica	(°C)	72,2
Deslizamiento temperatura de ebullición a 1,013 bar	(K)	0,1
Presión de Ebullición a 25 °C	(bar)	16,4
Presión crítica	(bar)	49,5
Densidad del líquido a 25 °C	(kg/m³)	1,161
Densidad del vapor saturado a 1,013 bar	(kg/m³)	4,12
Densidad crítica	(kg/m³)	0,491
Calor de vaporización a punto de ebullición	(kJ/kg)	271,5
Calor específico del líquido a 25 °C y 1,013 bar	(kJ/kg)	1,86
Calor específico del vapor a 25 °C y 1,013 bar	(kJ/kg)	0,82
Punto de inflamabilidad		No
Destrucción de ozono		0
GWP		1.725

Los aspectos ambientales a tener en cuenta en los refrigerantes son: la capacidad de destruir la capa de ozono y su contribución al efecto invernadero.

Los gases de efecto invernadero son los encargados de captar la radiación proveniente del Sol y mantenerla en la atmósfera. Si estos gases no existieran, la temperatura media de la Tierra sería -18°C [11]. El inconveniente aparece cuando hay demasiada cantidad de estos gases, lo cual provoca que la temperatura media de la Tierra incremente considerablemente.

El ozono es el encargado de absorber las radiaciones ultravioletas que provienen del Sol. La emisión de cloro, al contribuir en la destrucción del ozono, provoca un aumento de exposición a estas radiaciones ultravioletas, las cuales son muy perjudiciales.

Para medir el impacto que produce un sistema de refrigeración a la atmósfera durante su vida útil se utiliza el parámetro TEWI (Total Equivalent Warming Impact), que es el impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico. Mide las emisiones de CO₂ que produce la energía necesaria para hacer funcionar el sistema de refrigeración. Sus unidades son kilogramos equivalentes de CO₂ [31]. Se calcula a partir de la *Ecuación 6.18*.

$$TEWI = [PCA \cdot L \cdot n] + [PCA \cdot m \cdot (1 - \alpha)] + [n \cdot E_{anual} \cdot \beta] \quad (Ec. 6.18)$$

Donde:

PCA es el potencial de calentamiento atmosférico, referido a CO_2 . Para el R410a, el GWP es de 1.725.

L son las fugas en kilogramos por año. En este caso se estima un 5% de fugas.

n es el tiempo de funcionamiento del sistema en años. Se estiman 20 años de vida útil y como el uso del sistema al año son 2.850 horas, como se indica en el apartado 6.5.2, el tiempo de funcionamiento del sistema es 6,5 años.

m es la carga del refrigerante en kilogramos. El fabricante de la bomba de calor geotérmica, Ecoforest, establece que la carga de refrigerante es de 1,5 kg.

α es el factor de recuperación de 0 a 1. Se estima un factor de recuperación de 0,8.

E_{anual} es el consumo energético en kWh al año. El consumo energético anual viene dado por la *Ecuación 6.19*.

$$\text{Consumo anual energía} = \frac{ERES_{calefacción}}{COP} + \frac{ERES_{refrigeración}}{EER} \quad (Ec. 6.19)$$

Los valores de cada parámetro de la *Ecuación 6.19* se pueden observar en el apartado 6.5.3. Sustituyéndolos, se obtiene un consumo anual de energía de 5.529,83 kWh/año.

β es la emisión de CO_2 en kilogramos por kWh. La emisión de CO_2 para el caso de la electricidad es 4,05 t CO_2 /tep [32]. Como 1 kWh es 0,000086 tep, se obtiene una emisión de 0,3483 kg CO_2 /kWh.

Finalmente, se obtiene un $TEWI$ de 13.597,38 kilogramos equivalentes de CO_2 .

CAPÍTULO VII: SISTEMA DE CAPTACIÓN

7.1. Introducción

El sistema de captación se ha de diseñar adecuadamente debido a que puede suponer alrededor del 60% del coste total de la instalación [2]. Para obtener un buen diseño de este sistema se tiene que saber:

- Localización de la vivienda: Se ha de conocer tanto las condiciones climatológicas de la localidad en la que está ubicada la vivienda así como el terreno en el que está asentada.

Se ha de saber si el terreno es duro o blando debido a que en función de esto será mayor o menor costosa la ejecución de las perforaciones.

También se debe tener información sobre la composición del subsuelo para poder calcular las conductividades y capacidades térmicas de cada capa.

La superficie del terreno también es muy importante ya que en función de esta se puede realizar una captación horizontal o una captación vertical.

- Superficie que se va a climatizar: Se debe disponer del valor de la superficie de la vivienda que se desea calefactar y refrescar. También es preciso conocer las temperaturas que se buscan alcanzar en su interior. De esta forma, se puede hallar la potencia necesaria que ha de tener la bomba de calor geotérmica para cubrir las necesidades energéticas.
- Sistema de distribución: El sistema de distribución propicio para la energía geotérmica de muy baja entalpía es el suelo radiante debido a que funciona con temperaturas muy inferiores a otros sistemas como podría ser mediante radiadores.

7.2. Descripción del sistema de captación

El sistema de captación se diseña con el programa Geo Ciatesa [33]. Este software es producto de Ciatesa y la Universidad Politécnica de Valencia, concretamente el Grupo de Investigación y Modelado de Sistemas Térmicos del Departamento de Termodinámica Aplicada.

Geo Ciatesa tiene por objetivo el dimensionamiento de intercambiadores enterrados acoplados a bombas de calor. Está basado en el método de cálculo propuesto por el Manual "Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems, Installation Guide" [34].

El programa se estructura en cinco pestañas [33]: cuatro en las que se han de proporcionar datos y una en la que aparecen los resultados.

7.2.1. Configuración

Esta pestaña posibilita seleccionar la configuración deseada para el intercambiador enterrado. Se puede escoger entre cinco configuraciones de intercambiadores horizontales y una de intercambiador vertical.

Además hay que señalar:

- El número de bucles: representa el número de circuitos en paralelo en que se divide el flujo principal
- El número de filas de pozos: representa el número de pozos en dirección Y.
- El número de columnas de pozos: representa el número de pozos en dirección X.
- La distancia entre dos pozos adyacentes en la misma dirección, X o Y.
- La profundidad de los pozos (sólo para horizontales) [33].

En este proyecto se utiliza una configuración con intercambiador vertical con:

- Una sola fila de pozos
- Tres columnas de pozos.
- Una distancia de siete metros entre pozos contiguos en la dirección X.

Se ha de tener en cuenta que el software proporciona la longitud total del intercambiador (L_{Total}). Para conocer la profundidad de cada perforación (L_u) se ha de dividir la longitud total del intercambiador entre el número total de perforaciones y por dos (debido a que se trata de un tubo de subida y un tubo de bajada). Lo anterior se muestra en la *Ecuación 7.1* [33].

$$L_u = \frac{L_{Total}}{2 \cdot N \cdot M} \quad (Ec. 7.1)$$

7.2.2. Materiales

En esta pestaña se introducen los datos de los tubos que se usan para la construcción del intercambiador enterrado.

Esta pestaña consta de dos partes:

- En la primera hay que especificar los datos del intercambiador de calor enterrado. Se subdivide en datos de los materiales y datos de la tubería.

Para los datos de los materiales se tienen dos opciones de elección: seleccionar un material estándar o un material no estándar. En el no estándar se han de conocer los datos sobre la conductividad del tubo en W/m K, la rugosidad absoluta en mm y la presión nominal en bar. Sin embargo, si se escoge el material estándar se elige el material y la presión nominal mediante un desplegable.

Para los datos de la tubería se ha de elegir el diámetro del tubo, pudiendo usar en este caso también un diámetro estándar o no estándar.

- En la segunda parte hay que especificar los datos del colector. Se subdivide en datos de los materiales, datos de la tubería y longitud del colector.

Al igual que en la primera parte, para los datos de los materiales se tienen dos opciones: un material estándar o un material no estándar. En el no estándar se han de saber los datos sobre la rugosidad absoluta en mm y la presión nominal en bar. Para el material estándar se elige el material y la presión nominal mediante un desplegable.

Idéntico a la primera parte, para los datos de la tubería se ha de incluir el diámetro de la tubería escogiendo entre un diámetro estándar y uno no estándar.

En esta parte además se ha de meter la longitud del colector, teniendo en cuenta que ésta se refiere a la ida más la vuelta [33].

La elección del diámetro de los tubos se realiza cumpliendo los requisitos de caída de presión y del funcionamiento térmico. Se debe procurar que la caída de presión sea lo más pequeña posible para disminuir la potencia de bombeo. También se debe intentar que el fluido que circula por el sistema de captación tenga régimen turbulento para que haya mayor intercambio térmico.

Lo último se satisface cuando se cumple la *Ecuación 7.2* [22]:

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot \mu \cdot D} > 2.300 \quad (Ec. 7.2)$$

Donde:

Re es el número de Reynolds que caracteriza al flujo como laminar o turbulento.

Q es el caudal en m^3/s .

ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 .

μ es la viscosidad dinámica del fluido en $kg/s\ m$.

D es el diámetro de la tubería en m .

Se ha de tener presente que en configuraciones verticales, según se profundiza, la presión incrementa aproximadamente 1 bar cada 10 metros de profundidad.

La resistencia térmica de los tubos viene determinada a partir de la *Ecuación 7.3* [22]:

$$R_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) \quad (Ec. 7.3)$$

Donde:

R_p es la resistencia térmica del tubo en $K\ m/W$.

k_p es la conductividad térmica del tubo en $W/m\ K$.

D_0 es el diámetro exterior del tubo en metros.

D_1 es el diámetro interior del tubo en metros.

En este proyecto los datos introducidos en el programa son:

- Datos del intercambiador enterrado:
 - o Material Estándar: Polietileno 32 con una resistencia de 3,2 MPa y una conductividad térmica de 0,40678 W/m K.
 - o Presión Nominal: 10 bares.
 - o Diámetro Nominal: 1 ½”.
- Datos del colector:
 - o Material Estándar: Polietileno 32 con una resistencia de 3,2 MPa y una conductividad térmica de 0,40678 W/m K.
 - o Presión Nominal: 10 bares.
 - o Diámetro Nominal: 1 ½”.
 - o Longitud del colector: 60 metros.

Poseen un diámetro interior de 29 mm y un diámetro exterior de 40 mm. A partir de la *Ecuación 7.3*, se tiene una resistencia térmica de 0,1258 K m/W.

7.2.3. Clima y suelo

En esta pestaña se han de proporcionar los datos del suelo y las cargas térmicas de la vivienda. Aquí se introduce también la localidad de la vivienda pues el programa tiene una base de datos con las temperaturas de cada localidad para conocer los datos del clima a lo largo del año, escogiendo los valores extremos a la hora de realizar los cálculos.

- Datos del suelo: Se puede seleccionar un tipo de suelo escogiéndolo entre 28 posibilidades, e indicar la humedad que posee éste a la profundidad del intercambiador. Otra posibilidad es que se introduzcan los valores de la conductividad térmica y capacidad térmica del suelo si se posee esta información.
- Datos de las cargas térmicas: En primer lugar se ha de seleccionar el tipo de edificio para el cual se están realizando los cálculos. Posteriormente se ha de proporcionar las cargas térmicas de calefacción y refrigeración en kW.

Se ha de indicar también el fluido geotérmico del intercambiador [33].

Se tiene que cumplir que la temperatura del suelo que se da a cierta profundidad del suelo no es superior a la temperatura máxima (T_H) ni inferior a la temperatura mínima (T_L). Los valores de estas temperaturas se obtienen a partir de la *Ecuación 7.4* y de la *Ecuación 7.5* [22] respectivamente.

$$T_L(X_S) = T_m - A_S \cdot e^{\left(-X_S \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right)} \quad (Ec. 7.4)$$

$$T_H(X_S) = T_m + A_S \cdot e^{\left(-X_S \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}\right)} \quad (Ec. 7.5)$$

Donde:

T_m es la temperatura media de la tierra. Se estima que es la temperatura seca media anual de la localidad.

A_S es la amplitud anual de la temperatura media diaria. Esta es la diferencia entre la temperatura media del mes más caluroso y la temperatura media del mes más frío medida en °C. En los sistemas verticales se simplifica considerando este valor nulo.

X_S es la profundidad medida en metros.

α es la difusividad térmica del terreno. Es el ratio entre la conductividad térmica del terreno en W/m K y la capacidad térmica del terreno en MJ/K m³.

En este proyecto los datos introducidos en el programa son:

- Datos del suelo: Se obtienen del *Capítulo III*.
 - o Conductividad térmica: 2,492 W/m K.
 - o Capacidad térmica: 2,486 MJ/K m³.
- Datos de las cargas térmicas: Se trata de una vivienda unifamiliar.
 - o Carga térmica de calefacción: 8,839 kW.
 - o Carga térmica de refrigeración: 9,083 kW.

El fluido geotérmico es una mezcla de agua con glicol. El glicol se requiere cuando se prevea que la temperatura del agua en invierno pueda llegar a una temperatura inferior a 5°C [33]. En este proyecto se utiliza un porcentaje del 30,5% de glicol. Las características termofísicas del agua con este porcentaje de glicol se muestran en la *Tabla 7.1*.

Tabla 7.1: Características termofísicas del agua glicolada (30,5%). [WB15]

Temperatura de fusión (°C)	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad térmica (W/m K)	Viscosidad dinámica (mPa s)
-15	30	1.035	3.760	0,472	1,68
	20	1.039	3.730	0,463	2,19
	10	1.043	3.700	0,454	3,03
	0	1.046	3.665	0,444	4,35
	-10	1.048	3.635	0,435	6,80
	-15	1.049	3.620	0,430	8,60

7.2.4. Pérdidas de carga

En esta pestaña se proporcionan los datos requeridos para que el programa calcule las pérdidas de carga hidráulica en el sistema. Se puede optar por introducir los datos de:

- Pérdidas en accesorios: Se subdivide a su vez en:
 - o Colector: Se debe meter el número de codos de 90° y de 45°, de reducciones, de T's y de válvulas.
 - o Por cada bucle enterrado: Se debe meter el número de codos de 90° y de 45°, de reducciones, de T's, de válvulas y de U's.
- Pérdidas en accesorios (Cálculo aproximado): En esta parte se introducen de una forma aproximada las longitudes equivalentes para el colector y para cada bucle enterrado [33].

En este proyecto se utiliza:

- Pérdidas en accesorios (Cálculo aproximado): Se estima que se tiene una longitud equivalente de dos metros para el colector y una longitud equivalente de cinco metros para cada bucle enterrado.

7.2.5. Resultados

Esta pestaña se divide en tres partes:

- La primera parte indica la temperatura del agua del circuito interior, es decir, el conectado al edificio. En esta parte, el programa muestra:

Para invierno:

- Temperatura de agua caliente en °C: es a la cual sale el fluido de la bomba de calor hacia el circuito interior del edificio.
- Temperatura de agua fría en °C: es a la cual entra el fluido a la bomba de calor desde el circuito interior del edificio

Para verano:

- Temperatura de agua caliente en °C: es a la cual entra el fluido a la bomba de calor desde el circuito interior del edificio
 - Temperatura de agua fría en °C: es a la cual sale el fluido de la bomba de calor hacia el circuito interior del edificio.
- La segunda parte: Se ven los resultados obtenidos para invierno. En esta se muestran varias opciones que proporcionan: la temperatura de salida en °C, el COP, la potencia calorífica de la bomba en kW, la potencia absorbida por el compresor en kW, el caudal nominal en m³/h, la longitud total del tubo en metros, la pérdida de carga por fricciones en m.c.a., el área afectada en m² y el volumen afectado en m³.
 - La tercera parte: Se ven los resultados obtenidos para verano. En esta se muestran varias opciones que proporcionan: la temperatura de salida en °C, el EER, la potencia frigorífica de la bomba en kW, la potencia absorbida por el compresor en kW, el caudal nominal en m³/h, la longitud total del tubo en metros, la pérdida de carga por fricciones en m.c.a., el área afectada en m² y el volumen afectado en m³ [33].

Las temperaturas de los fluidos a las cuales salen hacia el terreno desde la bomba de calor, en modo de calefacción y en modo de refrigeración, se pueden calcular a partir de la *Ecuación 7.6* y de la *Ecuación 7.7*, respectivamente [22]:

$$T_{salida,c} = T_{entrada,c} - \frac{P_c \cdot \frac{COP - 1}{COP}}{C_p \cdot Q} \quad (Ec. 7.6)$$

$$T_{salida,f} = T_{entrada,f} + \frac{P_f \cdot \frac{EER + 1}{EER}}{C_p \cdot Q} \quad (Ec. 7.7)$$

Donde:

$T_{salida,c}$ es la temperatura del fluido de salida desde la bomba de calor hacia el terreno en °C, en modo de calefacción.

$T_{salida,f}$ es la temperatura del fluido de salida desde la bomba de calor hacia el terreno en °C, en modo de refrigeración.

$T_{entrada,c}$ es la temperatura del fluido de entrada desde el circuito interior del edificio hacia la bomba de calor en °C, en modo de calefacción.

$T_{entrada,f}$ es la temperatura del fluido de entrada desde el circuito interior del edificio hacia la bomba de calor en °C, en modo de refrigeración.

P_c es la potencia calorífica en kW.

P_f es la potencia frigorífica en kW.

COP es el rendimiento de la bomba de calor en modo de calefacción.

EER es el rendimiento de la bomba de calor en modo de refrigeración.

C_p es el calor específico del agua en kJ/kg °C. Son 4,18 kJ/kg °C.

Q es el caudal en l/s.

De esta forma las temperaturas máximas y mínimas de entrada a la bomba de calor desde el intercambiador enterrado se pueden hallar a partir de la *Ecuación 7.8* y de la *Ecuación 7.9* [22] respectivamente:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}(T_{entrada,f} + T_{salida,f}) \quad (Ec. 7.8)$$

$$T_{m\acute{i}n} = \frac{1}{2}(T_{entrada,c} + T_{salida,c}) \quad (Ec. 7.9)$$

La longitud total del intercambiador enterrado necesario para conseguir cubrir las demandas requeridas se calcula a partir de la *Ecuación 7.10* y de la *Ecuación 7.11* [22], en modo de calefacción y de refrigeración respectivamente:

$$L_{calefacción} = \frac{P_c \cdot \frac{COP - 1}{COP} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{calefacción})}{T_L - T_{mín}} \quad (Ec. 7.10)$$

$$L_{refrigeración} = \frac{P_f \cdot \frac{EER + 1}{EER} \cdot (R_p + R_s \cdot F_{refrigeración})}{T_{máx} - T_H} \quad (Ec. 7.11)$$

Donde:

L es la longitud total del intercambiador enterrado en modo de calefacción o refrigeración medida en metros.

P es la potencia calorífica o frigorífica en Watios.

COP es el rendimiento de la bomba de calor en modo de calefacción.

EER es el rendimiento de la bomba de calor en modo de refrigeración.

R_p es la resistencia térmica del tubo en K m/W.

R_s es la resistencia térmica del suelo. Esta es la inversa a la conductividad térmica del suelo, se mide en m K/W.

F es el factor de utilización en modo de calefacción o refrigeración.

T_L es la temperatura mínima del terreno en °C.

T_H es la temperatura máxima del terreno en °C.

$T_{máx}$ es la temperatura máxima del fluido a la entrada de la bomba de calor desde el intercambiador enterrado en °C.

$T_{mín}$ es la temperatura mínima del fluido a la entrada de la bomba de calor desde el intercambiador enterrado en °C.

En este proyecto los datos introducidos son:

- Para invierno: temperatura de agua caliente: 50°C, temperatura de agua fría: 45°C; Para verano: temperatura de agua caliente: 12°C, temperatura de agua fría: 7°C.
- Para invierno:
 - Temperatura de salida: 5°C.
 - COP: 3,3
 - Potencia calorífica: 10,9 kW.
 - Potencia absorbida por el compresor: 3,3 kW.
 - Caudal nominal: 1,99 m³/h.
 - Longitud total del tubo: 363 m.

- Pérdida de carga por fricción: 4,62 m.c.a.
- Área afectada: 12 m².
- Volumen afectado: 3,21 m³.
- Para verano:
 - Temperatura de salida: 30°C.
 - EER: 4,23
 - Potencia frigorífica: 11 kW.
 - Potencia absorbida por el compresor: 2,6 kW.
 - Caudal nominal: 1,99 m³/h.
 - Longitud total del tubo: 162 m.
 - Pérdida de carga por fricción: 3,81 m.c.a.
 - Área afectada: 12 m².
 - Volumen afectado: 1,427 m³.

Finalmente, de la *Ecuación 7.1* se obtiene la longitud de cada perforación:

$$L_u = \frac{L_{Total}}{2 \cdot N \cdot M} = \frac{363}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 60,5 \text{ m}$$

Por lo tanto, la longitud de la sonda para cada bucle será de 121 metros.

CAPÍTULO VIII: ESTUDIO ECONÓMICO Y AMBIENTAL

En este capítulo se va a comparar económica y medioambientalmente la instalación geotérmica de la vivienda unifamiliar, objeto de este trabajo, con los sistemas convencionales de climatización de edificios. En primer lugar, se expone el presupuesto total del proyecto: el coste del sistema de distribución encargado de climatizar la vivienda y el coste de la instalación de geotermia, conteniendo ambos la mano de obra, ingeniería y legislación. Este último, además, incluye el precio del sistema de captación y el de la bomba de calor geotérmica.

Posteriormente, estos importes de la instalación de geotermia se enfrentan a los que implicaría la implantación de los otros sistemas convencionales, los cuales contienen el precio de los componentes, la mano de obra, la legislación, etc.

Igualmente, se estudia las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que producen cada sistema a lo largo del año.

8.1. Presupuesto

El presupuesto total de la instalación geotérmica en la vivienda está compuesto por la instalación de climatización de la vivienda, basada en el sistema de suelo radiante/refrescante, y por la instalación de geotermia en sí.

A continuación, en las *Tablas 8.1-8.6*, se muestra un desglose de cada uno de los componentes que forman la instalación global. Tras ello, se expone la *Tabla 8.7* que contiene el resumen del presupuesto final.

Sistema de distribución

Partida: Tubos y materiales aislantes

Tabla 8.1: Costes de los tubos y materiales aislantes del sistema de distribución.
[WB9]

	Unidades	Precio Unitario		Precio (€)
		Precio	Unidades	
Tubo Polibutileno 16 mm	1.181	1,56	€/m	1.842,36
Tubo Distribución de agua	48	14,38	€/m	690,24
Panel SD 25/25	18	169,69	€/unidad	3.054,42
Zócalo	3	92	€/unidad	276
TOTAL				5.863,02

Partida: Accesorios y dispositivos de regulación y control

Tabla 8.2: Costes de los accesorios y dispositivos de regulación y control del sistema de distribución. [WB9]

	Unidades	Precio Unitario		Precio (€)
		Precio	Unidades	
Clips tubo 16 mm	7	37	€/unidad	259
Aditivo mortero	4	180,9	€/unidad	723,6
Soporte para curvas	8	14,85	€/unidad	118,8
Caja control interior	1	16	€/unidad	16
Placa electrónica de expansión	1	110	€/unidad	110
Sensor temperatura del suelo	1	50	€/unidad	50
Sonda rocío	1	160	€/unidad	160
TOTAL				1.437,40

Partida: Colectores y sus accesorios

Tabla 8.3: Costes de los colectores y accesorios del sistema de distribución. [WB9]

	Unidades	Precio Unitario		Precio (€)
		Precio	Unidades	
Colector 10 vías	1	476,62	€/unidad	476,62
Colector 8 vías	3	408,82	€/unidad	1.226,46
Colector 6 vías	1	350,6	€/unidad	350,6
Conexión al colector	20	7,54	€/unidad	150,8
Válvula de presión diferencial	1	39,56	€/unidad	39,56
Caja metálica 600 de 3 a 6 vías	1	151,71	€/unidad	151,71
Caja metálica 800 de 7 a 12 vías	2	193,08	€/unidad	386,16
TOTAL				2.781,91

Bomba de calor geotérmica

Tabla 8.4: Coste de la bomba de calor geotérmica. [WB13]

	Unidades	Precio Unitario (€/unidad)	Precio (€)
BCG ECOGEO C3	1	7.800	7.800

Sistema de captación

Partida: Tubos, agua glicolada y accesorios

Tabla 8.5: Costes de los tubos, el agua glicolada y los accesorios del sistema de captación. [35]

	Unidades	Precio Unitario		Precio (€)
		Precio	Unidades	
Tubo Polietileno 1,5" sondas	363	1,77	€/m	642,51
Tubo Polietileno 1,5" colector	60	1,77	€/m	106,20
Agua con glicol 30,5%	147	3,13	€/l	460,39
Válvulas, sondas Tª y P,...	1	1.000	€/unidad	1.000
TOTAL				2.209,10

Partida: Perforaciones

Tabla 8.6: Costes de las perforaciones del sistema de captación. [35]

	Unidades	Precio Unitario (€/m)	Precio (€)
Perforación rotación con circulación directa 140 mm y relleno de sondeos	363	43	15.609

Tabla resumen de la instalación total

Tabla 8.7: Resumen del presupuesto total.

	Elementos	Precio (€)	Precio (€)
Sistema de distribución	Tubos y materiales aislantes	5.863,02	10.082,33
	Accesorios y regulación y control	1.437,40	
	Colectores y sus accesorios	2.781,91	
BCG	ECOGEO C3	7.800	7.800
Sistema de captación	Tubos, agua glicolada y accesorios	2.209,10	17.818,10
	Perforaciones	15.609	
Montaje, ingeniería y legalización [35]		2.500	2.500
		TOTAL	38.200,43

8.2. Estudio económico

El estudio económico mostrado en este apartado se basa en la comparación de una instalación geotérmica frente a otros sistemas convencionales, incorporándolos a una vivienda unifamiliar con un sistema de climatización de suelo radiante/refrescante.

Por ello, el estudio comprende el coste de la instalación total de cada sistema de climatización y el consumo anual de energía que implica cada uno.

Finalmente, se realiza un análisis para comprobar si el proyecto es beneficioso o no. En caso de acreditar su rentabilidad, se calcula el número de años que se necesitarían para amortizarlo.

Los sistemas con los que se va a comparar la geotermia son:

- Gas Natural
- Gasóleo
- Propano
- Bomba de calor aerotérmica

Todos estos sistemas están apoyados por una instalación de solar térmica que cubre un 7% de la demanda energética. Es un sistema termosifónico por lo que no consume energía eléctrica al carecer de bomba. El precio de la instalación de este sistema, incluyendo materiales, mano de obra, legalización, etc... es de 3.500€ [35].

Además, para los sistemas de Gas Natural, Gasóleo y Propano, se dispone de una enfriadora para cubrir la demanda de refrigeración. Esta posee 15 kW de potencia, un EER de 2,5, 500 horas de funcionamiento y un aporte anual de energía de 6.750 kWh. El precio de la instalación de este sistema, incluyendo materiales, mano de obra, legalización, etc... es de 8.000€ [35].

La instalación de geotermia no necesita estos dos complementos.

8.2.1. Costes de los combustibles

El precio de los combustibles, con IVA incluido, se muestra en la *Tabla 8.8*.

Tabla 8.8: Precios de los combustibles. [35]

Combustible	Precio (€/kWh)
Gas Natural	0,06413
Gasóleo	0,10592
Propano	0,09413
Electricidad	0,18150

8.2.2. Costes de los sistemas

Gas Natural

El aporte anual de energía, en kWh, por parte de la caldera de Gas Natural se calcula con la *Ecuación 8.1*:

$$\text{Aporte anual energía} = ERES_{total} - \text{Aporte anual energía}_{enfriadora+energía solar} \quad (\text{Ec. 8.1})$$

El consumo anual de energía, en kWh, por parte de la caldera de Gas Natural se halla a partir de la *Ecuación 8.2*:

$$\text{Consumo anual energía}_{Gas Natural} = \frac{\text{Aporte anual energía}_{Gas Natural}}{\eta_{caldera}} \quad (\text{Ec. 8.2})$$

Donde se supone un rendimiento de la caldera del 92%.

El coste anual de energía, en €, se calcula multiplicando el consumo anual de energía, en kWh, por el precio del combustible o electricidad, en €/kWh.

Los resultados obtenidos con dichas ecuaciones se muestran en la *Tabla 8.9*. Además, en la *Tabla 8.10*, se pueden observar los costes de instalación de la caldera de Gas Natural, de la enfriadora y de la instalación de energía solar. Estos costes de instalación incluyen mano de obra, legislación, materiales...

Tabla 8.9: Aporte, consumo y coste anual de la energía por la Instalación Total de Gas Natural.

	Aporte Anual Energía (kWh)	Consumo anual de energía (kWh)	Coste Anual Energía (€)
Gas Natural	19.471,58	21.164,76	1.357,30
Enfriadora	6.750,00	2.700	490,05
Energía Solar	1.465,60	-	-
TOTAL	27.687,184	23.864,76	1.847,35

Tabla 8.10: Coste Instalación Global de Gas Natural. [35]

Costes	Precio (€)
Instalación Gas Natural	7.500
Instalación Enfriadora	8.000
Instalación Solar Térmica	3.500
TOTAL	19.000

Gasóleo

Análogo al caso anterior, el aporte anual de energía, en kWh, por parte de la caldera de gasóleo se expresa mediante la *Ecuación 8.3*:

$$\text{Aporte anual energía} = ERES_{total} - \text{Aporte anual energía}_{enfriadora+energía solar} \quad (\text{Ec. 8.3})$$

El valor del consumo anual de energía, en kWh, por parte de la caldera de gasóleo se obtiene con la *Ecuación 8.4*:

$$\text{Consumo anual energía}_{Gasóleo} = \frac{\text{Aporte anual energía}_{Gasóleo}}{\eta_{caldera}} \quad (\text{Ec. 8.4})$$

Se estima un rendimiento de la caldera del 85%.

El coste anual de energía, en €, se calcula multiplicando el consumo anual de energía, en kWh, por el precio del combustible o electricidad, en €/kWh.

Los valores mencionados anteriormente se presentan en la *Tabla 8.11*. Además, en la *Tabla 8.12*, se señalan los costes de instalación de la caldera de gasóleo, de la enfriadora y de la instalación de energía solar. Estos costes de instalación comprenden mano de obra, legislación, materiales...

Tabla 8.11: Aporte, consumo y coste anual de la energía por la Instalación Total de Gasóleo.

	Aporte Anual Energía (kWh)	Consumo anual de energía (kWh)	Coste Anual Energía (€)
Gasóleo	19.471,58	22.907,74	2.426,38
Enfriadora	6.750,00	2.700	490,05
Energía Solar	1.465,60	-	-
TOTAL	27.687,184	25.607,74	2.916,43

Tabla 8.12: Coste Instalación Global de Gasóleo. [35]

Costes	Precio (€)
Instalación Gasóleo	7.000
Instalación Enfriadora	8.000
Instalación Solar Térmica	3.500
TOTAL	18.500

Propano

Como en las anteriores ocasiones, aplicando la *Ecuación 8.5* se define el aporte anual de energía, en kWh, que produce la caldera de propano:

$$\text{Aporte anual energía} = ERES_{total} - \text{Aporte anual energía}_{enfriadora+energía solar} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

El consumo anual de energía, en kWh, que implica la caldera de propano viene dado por la *Ecuación 8.6*:

$$\text{Consumo anual energía}_{propano} = \frac{\text{Aporte anual energía}_{propano}}{\eta_{caldera}} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

Considerando un rendimiento de la caldera del 88%.

El coste anual de energía, en €, se calcula multiplicando el consumo anual de energía, en kWh, por el precio del combustible o electricidad, en €/kWh.

Los valores logrados con las fórmulas anteriores se exhiben en la *Tabla 8.13*. Además, en la *Tabla 8.14*, se pueden ver los costes de instalación de la caldera de propano, de la enfriadora y de la instalación de energía solar. Estos costes engloban también mano de obra, legislación, materiales...

Tabla 8.13: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Total de Propano.

	Aporte Anual Energía (kWh)	Consumo anual de energía (kWh)	Coste Anual Energía (€)
Propano	19.471,58	22.126,80	2.082,78
Enfriadora	6.750,00	2.700	490,05
Energía Solar	1.465,60	-	-
TOTAL	27.687,184	24.826,80	2.572,83

Tabla 8.14: Coste Instalación Global de Propano. [35]

Costes	Precio (€)
Instalación Propano	7.250
Instalación Enfriadora	8.000
Instalación Solar Térmica	3.500
TOTAL	18.750

BC Aerotérmica

En esta situación, el aporte anual de energía, en kWh, proporcionado por la bomba de calor aerotérmica se calcula a partir de la *Ecuación 8.7*:

$$\text{Aporte anual energía} = ERES_{total} - \text{Aporte anual energía}_{energía solar} \quad (\text{Ec. 8.7})$$

El consumo anual de energía, en kWh, que conlleva la bomba de calor de aerotermia se halla mediante la *Ecuación 8.8*:

$$\text{Consumo anual energía}_{BC Aerotérmica} = \frac{\text{Aporte anual energía}_{BC Aerotérmica}}{\eta} \quad (\text{Ec. 8.8})$$

El rendimiento hace referencia al COP en modo de calefacción y al EER en modo de refrigeración. Se establece un COP y un EER de 2,5.

El coste anual de energía, en €, se calcula multiplicando el consumo anual de energía, en kWh, por el precio de la electricidad, en €/kWh.

Las soluciones alcanzadas aplicando dichas ecuaciones se indican en la *Tabla 8.15*. Además, en la *Tabla 8.16*, se observan los costes de instalación de la bomba de calor de aerotermia y de la instalación de energía solar. Estos costes de instalación contienen mano de obra, legislación, materiales...

Tabla 8.15: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Total con BC Aerotérmica.

	Aporte Anual Energía (kWh)	Consumo anual de energía (kWh)	Coste Anual Energía (€)
Aerotermia	26.221,58	10.488,63	1.903,69
Energía Solar	1.465,60	-	-
TOTAL	27.687,184	10.488,63	1.903,69

Tabla 8.16: Coste Instalación con BC Aerotérmica. [35]

Costes	Precio (€)
Instalación Aerotérmica	19.000
Instalación Solar Térmica	3.500
TOTAL	22.500

BC Geotérmica

El aporte anual de energía, en kWh, suministrado por la bomba de calor geotérmica coincide con el $ERES_{total}$, calculado en el *Capítulo VI*.

El consumo anual de energía, en kWh, que supone la bomba de calor geotérmica se obtiene con la *Ecuación 8.9*:

$$\text{Consumo anual energía} = \frac{ERES_{calefacción}}{COP} + \frac{ERES_{refrigeración}}{EER} \quad (\text{Ec. 8.9})$$

El coste anual de energía, en €, se calcula multiplicando el consumo anual de energía, en kWh, por el precio de la electricidad, en €/kWh.

Los valores mencionados anteriormente se muestran en la *Tabla 8.17*. Además, en la *Tabla 8.18*, se expone el precio de la instalación con bomba de calor geotérmica. Estos incluyen el coste de la bomba de calor geotérmica, el del sistema de captación y la mano de obra, materiales, ingeniería y legislación.

Tabla 8.17: Aporte, consumo y coste anual de la energía por Instalación Geotérmica.

	Aporte Anual Energía (kWh)	Consumo anual de energía (kWh)	Coste Anual Energía (€)
Geotermia	27.687,184	5.529,83	1.003,66

Tabla 8.18: Coste Instalación Geotérmica.

Costes	Precio (€)
Instalación Geotérmica	28.118,10

8.2.3. Comparativa de costes

Tras haber descrito el importe asociado a cada sistema, se procede a comparar el gasto inicial a partir del *Gráfico 8.1*. En este gráfico se puede observar que la inversión inicial en los tres primeros casos es del mismo orden aproximadamente. No obstante, el instalar una bomba de calor supone un mayor desembolso inicial, siendo aún mayor en el caso de la geotermia.

Sin embargo, en el *Gráfico 8.2*, ocurre justo lo contrario. Se puede comprobar que la energía consumida a lo largo del año por la geotermia es muy inferior a los demás sistemas.

Además, en el *Gráfico 8.3*, se muestra el coste anual de energía para cada sistema. En este, se puede ver que con la energía geotérmica se puede llegar a ahorrar una cantidad importante de dinero al año, lo que hace pensar en la

posibilidad de que la inversión inicial pueda ser amortizada en cierto período de tiempo.

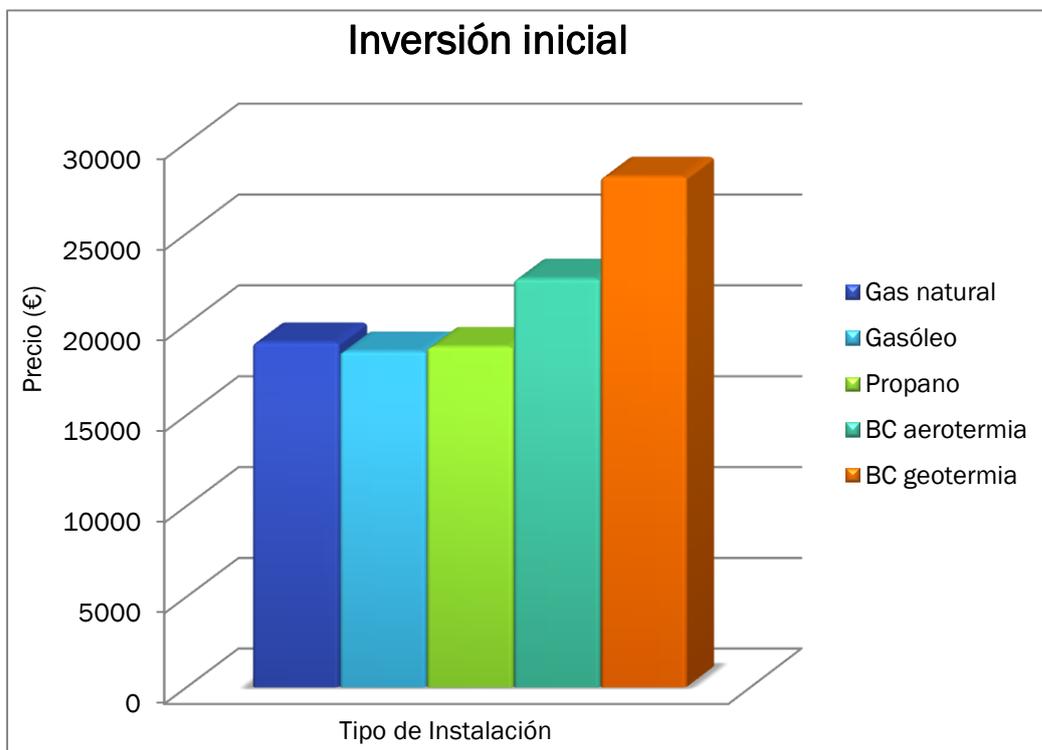


Gráfico 8.1: Comparativa de la inversión inicial entre los sistemas.

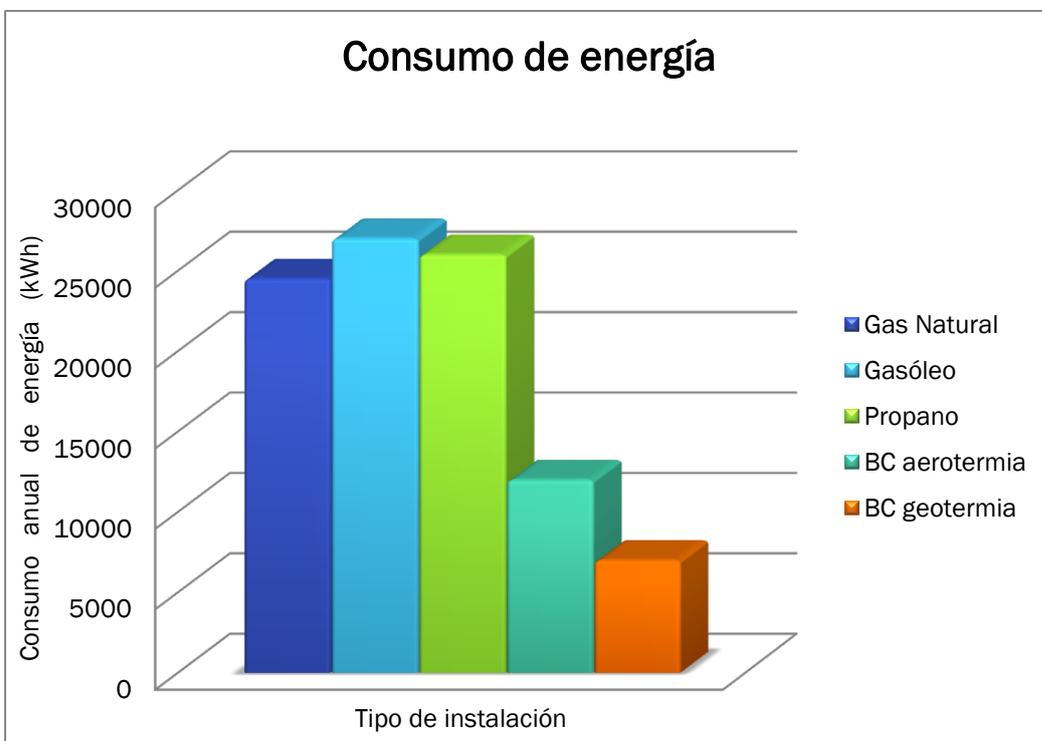


Gráfico 8.2: Comparativa del consumo anual de energía entre los sistemas.

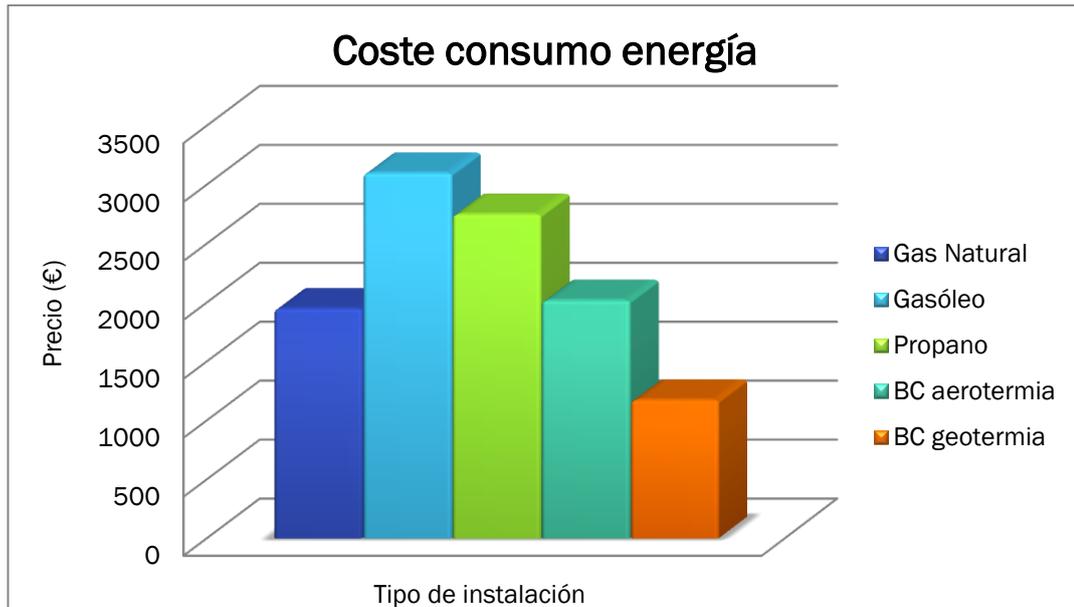


Gráfico 8.3: Comparativa del coste anual de energía entre los sistemas.

8.2.4. Estudio de amortizaciones

En este apartado se va a analizar si la instalación de geotermia puede llegar a suponer un beneficio económico fundamentado en el ahorro del coste anual de energía visto anteriormente.

Para ello, se va a calcular un conjunto de índices económicos que permitirán evaluar la amortización.

El VAN, o Valor Actualizado Neto, es el parámetro más conocido a la hora de analizar proyectos de inversión a medio-largo plazo. Se encarga de calcular la ganancia o pérdida total del proyecto analizando una determinada cantidad de años. El VAN se calcula mediante la Ecuación 8.10 [11].

$$VAN = Inversión + \sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (Ec. 8.10)$$

Donde:

Inversión es la diferencia entre el total de dinero utilizado para llevar a cabo la instalación y el total de dinero que implicaría una instalación convencional. Este parámetro tiene que tener un valor negativo.

T es el número de años que se va a utilizar para el estudio.

r es la tasa de descuento. Representa el coste de oportunidad, es decir, aquel dinero que se ganaría si, en vez de dedicar la inversión a la instalación, se destinara a una inversión libre de riesgo. Se suele usar un valor del 6%.

FC_t son flujos de caja. Estos representan la diferencia entre el coste de la instalación frente al coste de la instalación tradicional en un año. Se calcula a partir de la *Ecuación 8.11* [11].

$$FC = Q_t \cdot C_t - Q_e \cdot C_e \quad (\text{Ec. 8.11})$$

Donde

C_e es el consumo de energía eléctrica por la BCG en kWh.

C_t es el consumo de energía del sistema convencional en kWh.

C_e es el coste de la energía eléctrica en €/kWh.

C_t es el coste de la energía térmica tradicional en €/kWh.

Si se obtiene un VAN positivo, se confirma la rentabilidad de la instalación, por lo que se recuperará, al menos, toda la inversión ejecutada más la rentabilidad mínima exigida. Si se obtiene un VAN negativo, no se confirma la rentabilidad de la instalación por lo que no se recuperará la inversión realizada.

Otro parámetro que se utiliza es el *PRA*, o Período de Recuperación Actualizado. Representa la cantidad de años requeridos para llegar a amortizar la inversión y la rentabilidad mínima exigida. Se halla a partir de la *Ecuación 8.12* [11].

$$\text{Inversión} + \sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (\text{Ec. 8.12})$$

También se utiliza el *TIR*, o Tasa Interna de Retorno. Representa la rentabilidad de un proyecto frente a la inversión inicial. Se considera una inversión rentable cuando este valor es superior a la tasa de descuento. Se obtiene a partir de la *Ecuación 8.13* [11].

$$\text{Inversión} + \sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (\text{Ec. 8.13})$$

A continuación se va a comparar cada uno de los sistemas convencionales con la instalación geotérmica. Se van a analizar estos parámetros para un período de 10 años.

En los cálculos se tiene en cuenta que hay un incremento anual en el precio de los combustibles y de la electricidad. Se estima que el coste de los combustibles aumenta un 8% al año mientras que el coste de la electricidad aumenta un 3% al año.

BC Geotérmica vs. Gas Natural

La inversión que implica la bomba de calor geotérmica frente a una caldera de gas natural se presenta con la siguiente expresión:

$$\text{Inversión} = 19.000 - 28.118,098 = -9.118,098 \text{ €}$$

Calculando los flujos de caja y, seguidamente, el término $\sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t}$ para cada año evaluado, se obtiene el *Valor Actualizado Neto* en cada año, mostrado en la *Tabla 8.19* y la *Tabla 8.20*.

Tabla 8.19: VAN - BCG vs. Gas Natural (1).

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
VAN	-8.322,17	-7.400,47	-6.342,82	-5.138,21	-3.774,67

Tabla 8.20: VAN - BCG vs. Gas Natural (2).

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
VAN	-2.239,28	-5.18,01	1.404,32	3.544,14	5.919,24

La evolución del VAN durante el tiempo se observa en el *Gráfico 8.4*.

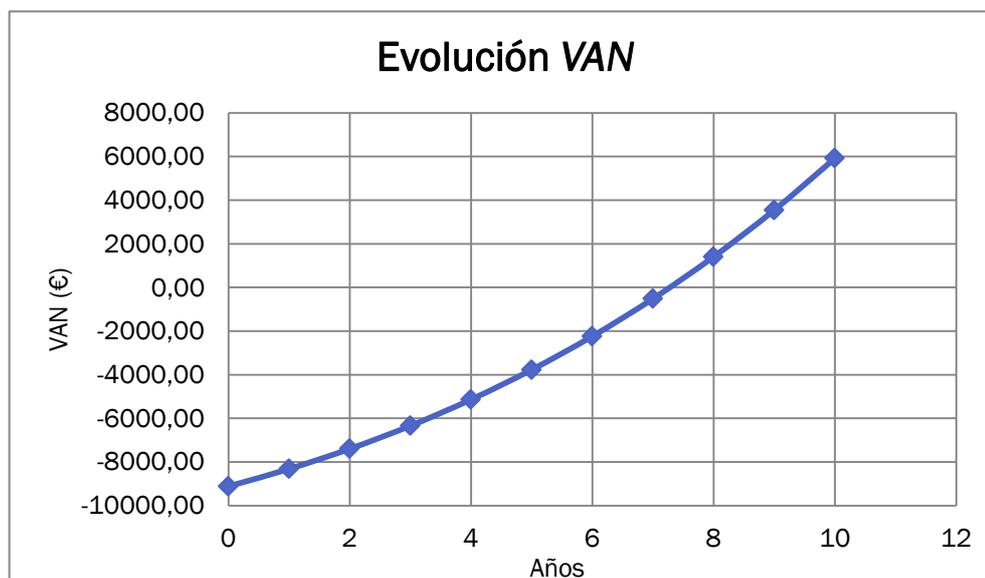


Gráfico 8.4: Evolución del VAN - BCG vs. Gas Natural.

Como se puede observar, al finalizar el período de 10 años de análisis, se obtiene un VAN superior a 0, dándose un *Período de Recuperación Actualizado* de 7 años y 4 meses. Además el *TIR*, a los 10 años, tiene un valor de 6,43%, que al ser superior a los 6% de la tasa de descuento, se puede decir que el proyecto es rentable.

BC Geotérmica vs. Gasóleo

A continuación se muestra la diferencia entre los costes iniciales de ambos sistemas:

$$\text{Inversión} = 18.500 - 28.118,098 = -9.618,098 \text{ €}$$

Hallando los flujos de caja y, posteriormente, el término $\sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t}$ para cada año evaluado, se consigue el *Valor Actualizado Neto* en cada año, indicado en la *Tabla 8.21* y la *Tabla 8.22*.

Tabla 8.21: VAN - BCG vs. Gasóleo (1).

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
VAN	-7.813,59	-5.783,60	-3.509,61	-9.71,58	1.852,16

Tabla 8.22: VAN - BCG vs. Gasóleo (2).

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
VAN	4.985,08	8.452,58	12.282,12	16.503,42	21.148,62

La evolución del VAN durante el tiempo se presenta en el *Gráfico 8.5*.

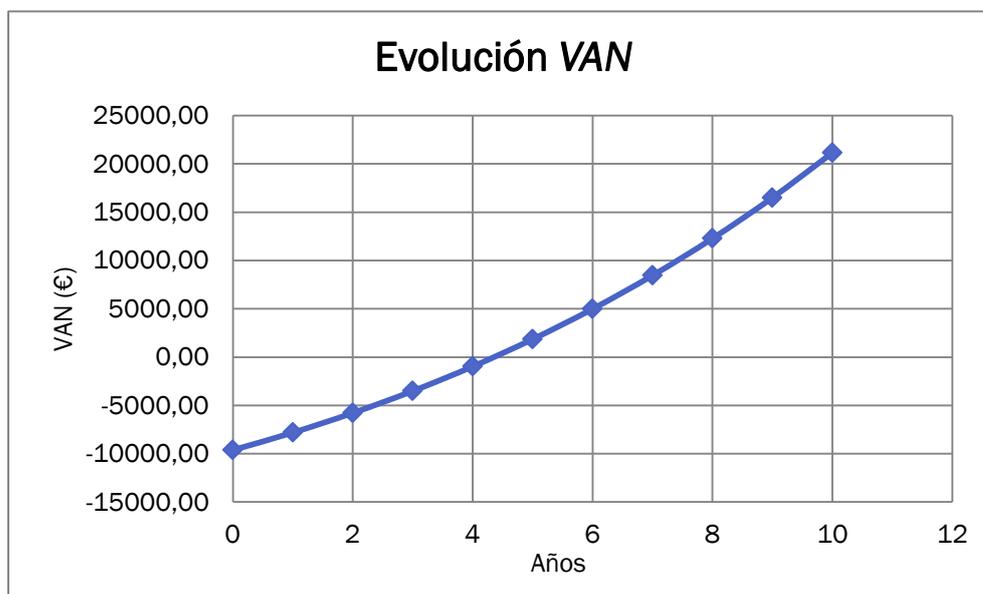


Gráfico 8.5: Evolución del VAN - BCG vs. Gasóleo.

En este caso también se consigue un VAN positivo al cabo de 10 años. El *PRA* es de 4 años y 5 meses. La *Tasa Interna de Retorno* es de 10,82%, también superior a la tasa de descuento, por lo que se tiene un proyecto rentable.

BC Geotérmica vs. Propano

El desembolso que conlleva decantarse por una bomba de calor geotérmica en vez de una caldera de propano es el siguiente:

$$\text{Inversión} = 18.750 - 28.118,098 = -9.368,098 \text{ €}$$

Resolviendo los flujos de caja y, después, el término $\sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t}$ para cada año evaluado, se logra el *Valor Actualizado Neto* en cada año, presentado en la *Tabla 8.23* y la *Tabla 8.24*.

Tabla 8.23: VAN - BCG vs. Propano (1).

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
VAN	-7.887,74	-6.213,93	-4.330,86	-2.221,38	133,07

Tabla 8.24: VAN - BCG vs. Propano (2).

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
VAN	2.752,57	5.658,85	8.875,44	12.427,78	16.343,40

La evolución del VAN durante el tiempo se observa en el *Gráfico 8.6*.

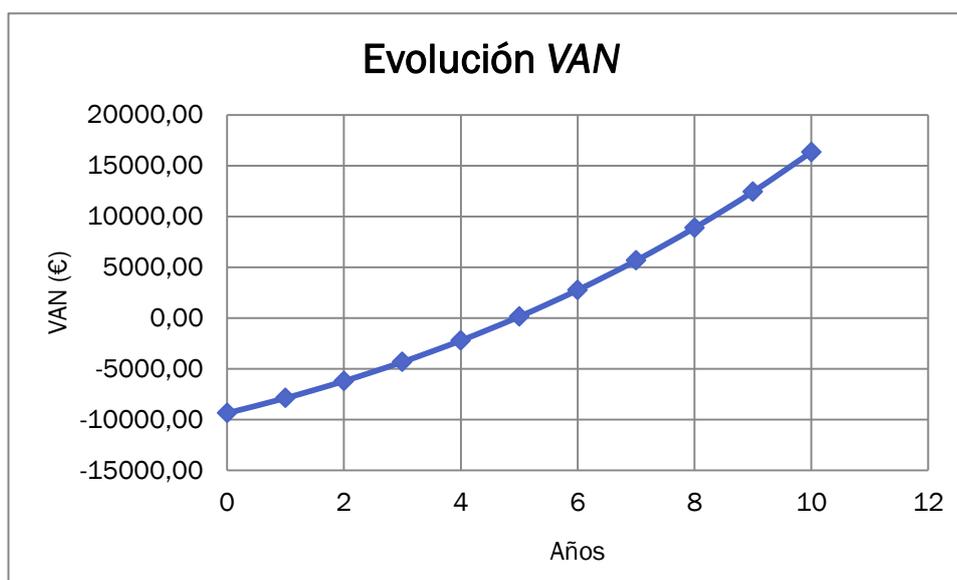


Gráfico 8.6: Evolución del VAN - BCG vs. Propano.

Como en los casos anteriores, el VAN resultante es positivo en la duración del estudio, con un *Período de Recuperación Actualizado* de 5 años. El *TIR* alcanza un 9,87%, superior a la tasa de descuento, por lo tanto se trata de un proyecto rentable.

BC Geotérmica vs. BC Aerotérmica

La diferencia entre los costes iniciales de ambos sistemas está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Inversión} = 22.500 - 28.118,098 = -5.618,098 \text{ €}$$

Solucionando los flujos de caja y, luego, el término $\sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t}$ para cada año evaluado, se obtiene el *Valor Actualizado Neto* en cada año, señalado en la *Tabla 8.25* y la *Tabla 8.26*.

Tabla 8.25: VAN – BCG vs. BC Aerotérmica (1).

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
VAN	-4.769,02	-3.918,50	-3.065,82	-2.210,24	-1.351,04

Tabla 8.26: VAN – BCG vs. BC Aerotérmica (2).

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
VAN	-487,49	381,14	1.255,61	2.136,66	3.025,04

La evolución del VAN durante el tiempo se muestra en el *Gráfico 8.7*.

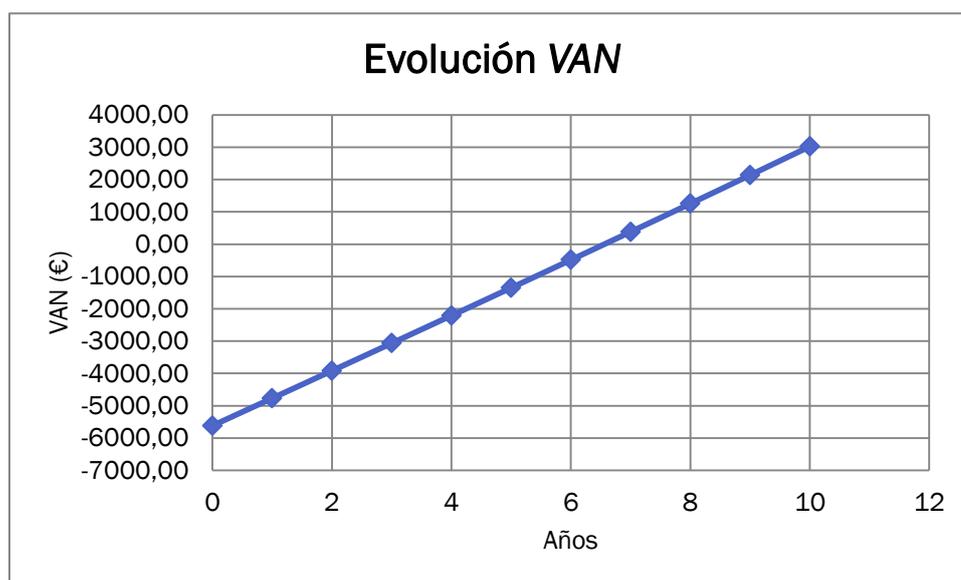


Gráfico 8.7: Evolución del VAN - BCG vs. BC Aerotérmica.

En esta ocasión, también se da un VAN superior a 0 en el período examinado, con un *Período de Recuperación Actualizado* de 6 años y 6 meses. El *TIR*, a los 10 años, tiene un valor de 7,93%, mayor que la tasa de descuento, obteniendo, como en los anteriores, casos un proyecto rentable.

8.3. Estudio ambiental

En este apartado se analiza las emisiones de CO₂ en función del sistema de climatización que se utilice. En la *Tabla 8.27* se muestran las emisiones de CO₂ según el tipo de combustible [32 y 36].

Tabla 8.27: Emisiones CO₂ según tipo de combustible.

Combustible	Emisiones CO ₂ (tCO ₂ /tep)	Emisiones CO ₂ (tCO ₂ /kWh)
Gas Natural	2,51	0,00021586
Gasóleo	3,42	0,00029412
Propano	2,8	0,0002408
Electricidad	4,05	0,0003483

A continuación se presentan las emisiones anuales para cada uno de los sistemas. Estas se obtienen a partir del producto del consumo de anual de energía y las emisiones de CO₂ por kWh.

En los tres primeros casos, además de tener en cuenta las emisiones que provienen de la combustión de los combustibles, se ha de sumar las emisiones originadas por la electricidad consumida por la enfriadora.

Para ambas bombas de calor únicamente se tendrá presente las emisiones producidas por la energía eléctrica consumida.

La *Tabla 8.28* muestra el consumo anual de energía y las emisiones de CO₂ al año que genera cada uno de los sistemas.

Tabla 8.28: Consumo de energía y emisiones anuales de CO₂ de los sistemas.

		Consumo anual de energía (kWh)		Emisiones anuales de CO ₂ (tCO ₂ /kWh)	
		Parcial	Total	Parcial	Total
Gas Natural	Gas Natural	21.164,76	23.864,76	4,569	5,509
	Enfriadora	2.700		0,940	
Gasóleo	Gasóleo	22.907,74	25.607,74	6,738	7,678
	Enfriadora	2.700		0,940	
Propano	Propano	22.126,80	24.826,80	5,328	6,268
	Enfriadora	2.700		0,940	
BC Aerotérmica		10.488,63	10.488,63	3,653	3,653
BC Geotérmica		5.529,83	5.529,83	1,926	1,926

Estos valores se pueden observar también en el *Gráfico 8.8*.

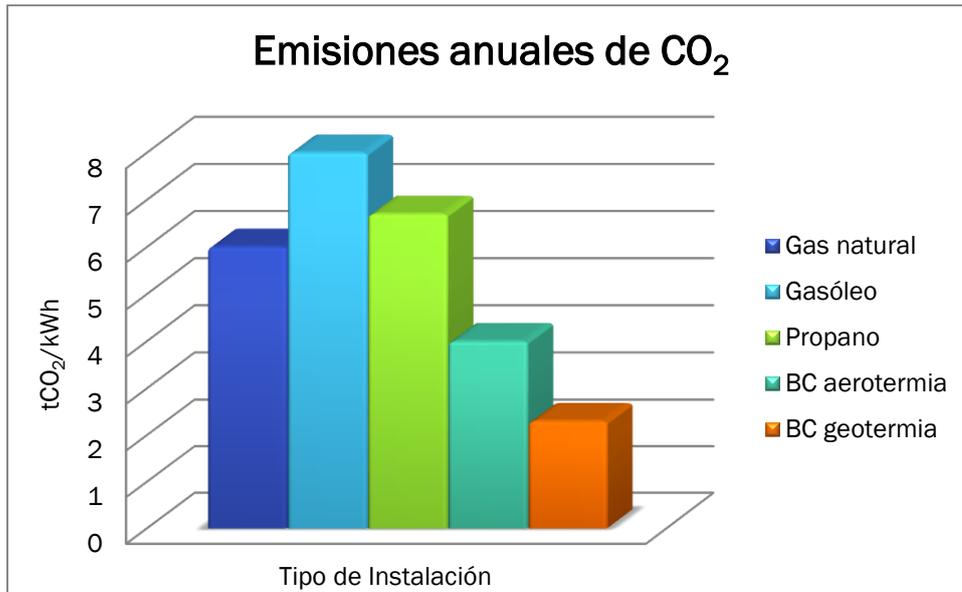


Gráfico 8.8: Comparativa de emisiones anuales de CO₂ entre los sistemas.

Como se aprecia en el Gráfico 8.8, las emisiones de CO₂ que produce la instalación con bomba de calor geotérmica son muy inferiores a las ocasionadas por los demás sistemas de climatización.

Por lo tanto, se comprueba que la instalación de geotermia no sólo supone un ahorro económico a medio-largo plazo, sino que también es beneficioso para el medio ambiente debido a las tan bajas emisiones.

CONCLUSIONES

El cálculo de la demanda energética de la vivienda unifamiliar objeto de este TFG, tanto para calefacción como para refrigeración, se ha realizado a partir del software *CalculoAire* de Saunier Duval. Se ha obtenido como resultado una demanda total de calefacción de 8.839 W y una demanda total de refrigeración de 9.083 W.

Se ha optado por un sistema de climatización basado en un suelo radiante/refrescante, el cual funciona eficientemente cuando se combina con la energía geotérmica. Se ha diseñado mediante el software *Suelo Radiante* de Saunier Duval. Se requiere un total de 1.181 metros de tuberías de polibutileno. Las temperaturas de impulsión en invierno y en verano son de 38,1 y 10,3°C respectivamente, y el caudal que circula, tanto en invierno como en verano, es de 25,61 l/min.

Para seleccionar la bomba de calor geotérmica se ha tenido en cuenta la demanda energética que se debe cubrir en la vivienda. El modelo de la bomba de calor seleccionada es ECOGEO C3 del fabricante Ecoforest. La potencia calorífica nominal es de 15 kW y la potencia frigorífica nominal es de 16,3 kW. Dispone de un acumulador de ACS de 170 litros, lo que permite cubrir los 120 litros de ACS al día requeridos en la vivienda.

El dimensionamiento del sistema de captación se ha realizado a partir del software *Geo Ciatesa* de Ciat. Se realizan tres perforaciones de 60,5 metros cada una, lo que hace un total de 363 metros de longitud de perforación. El sistema de captación se ha de diseñar correctamente pues supone el 47% del coste total del proyecto. El precio de las perforaciones es de 43 €/m. Además, las tuberías deben estar térmicamente aisladas y protegidas contra la corrosión, lo cual incrementa aún más el presupuesto.

La inversión inicial de la instalación geotérmica es superior a los otros sistemas convencionales. Respecto a las instalaciones de gas natural, gasóleo y propano, supone un incremento en el gasto inicial del 30-35%, mientras que comparado a la instalación aerotérmica implica un aumento de la inversión inicial del 20%.

El consumo energético anual de la geotermia respecto a las instalaciones de gas natural, gasóleo y propano, es un 75-80% inferior, mientras que comparado a la instalación aerotérmica implica un ahorro energético del 47%.

El coste anual de energía en las instalaciones de gas natural y aerotermia es un 45% superior al de la instalación geotérmica. En el caso de las instalaciones de gasóleo y de propano este aumento es del 60%.

La geotermia se pueda amortizar en un período de tiempo determinado. Para la instalación de gas natural se requieren siete años y medio, para las instalaciones de gasóleo y propano se precisan menos de cinco años y para la instalación aerotérmica se necesitan seis años y medio, aproximadamente.

La instalación de geotermia produce menos emisiones de CO₂ a la atmósfera que los otros sistemas. Las instalaciones de gas natural, gasóleo y propano, provocan un 65-75% más de CO₂ que la geotermia, y la instalación aerotérmica genera un 47% más.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

- [1] **Club Español de la Energía**. Conceptos de Ahorro y Eficiencia Energética: Evolución y Oportunidades. Biblioteca de la Energía. Madrid, 2010.
- [2] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME)**. Manual de Geotermia. Madrid, 2008.
- [3] **García Sánchez, Ignacio J.** Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC): La certeza de una herencia, el calentamiento global. Instituto Español de Estudios Estratégicos. 2013.
- [4] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Madrid, 2011.
- [5] **Plan de Acción para la Energía Sostenible (PAES)**. 2009.
- [6] **Comunicación de la Comisión al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo**. Una política energética para Europa. 2007.
- [7] **Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER)**. 2010.
- [8] **Asociación Cluxer da Xeotermia Galega (Acluxega)**. Informe Geotermia. 2011.
- [9] **Norma Alemana VDI 4640**. Thermische Nutzung des Untergrundes (Utilización térmica del subsuelo). 2010.
- [10] **Llopis Trillo, Guillermo y Rodrigo Angulo, Vicente**. Guía de la Energía Geotérmica. Madrid. 2008.
- [11] **Conde Lázaro, Eduardo, et al.** Guía Técnica de Bombas de Calor Geotérmicas. Madrid, 2009.
- [12] **Ministerio de Fomento**. Código Técnico de la Edificación (CTE): Documento Básico HE: Ahorro de energía, HE 1: Limitación de la demanda energética. 2006 con modificación del 2013.
- [13] **Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)**. Valores climatológicos normales Valladolid.
- [14] **Instituto Geológico y Minero de España (IGME)**. Hoja 29 del Mapa Hidrogeológico de España.

[15] **Ministerio de la Presidencia.** Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). 2007 con modificación del 2013.

[16] **Norma UNE-EN ISO 7730:2006:** Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

[17] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).** Guía técnica: Condiciones climáticas exteriores de proyecto. 2010.

[18] **Norma UNE-EN ISO 13790:2011:** Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios. (ISO 13790:2008).

[19] **Uponor.** Manual técnico: Aplicaciones de calefacción y climatización.

[20] **Norma UNE-EN 15377-2009:** Sistemas de calefacción en los edificios. Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua. Parte 1: Determinación de la capacidad nominal de diseño de calefacción y refrigeración. Parte 2: Diseño, dimensionamiento e instalación.

[21] **Norma UNE-EN 1264:2009:** Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 1: Definiciones y símbolos. Parte 2: Suelo radiante: Métodos para la determinación de la emisión térmica de los suelos radiantes por cálculo y ensayo.

[22] **Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR).** Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Madrid, 2010.

[23] **Norma UNE-EN 14511-2012:** Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Parte 1: Términos y definiciones. Parte 2: Condiciones de ensayo. Parte 3: Métodos de ensayo.

[24] **Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación (CTE):** Documento Básico HE: Ahorro de energía, HE 4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria. 2006 con modificación del 2013.

[25] **Ministerio de la Presidencia.** Decisión de la comisión por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, conforme a lo dispuesto en el artículo 5 de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. 2013.

[26] **Norma UNE-EN 94002-2004:** Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la demanda de energía térmica.

[27] **Enertres**. Producción de ACS con bomba de calor geotérmica. Madrid, 2008.

[28] **Ministerio de Industria, turismo y comercio**. La Directiva 2009/28/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. 2009.

[29] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor. Madrid, 2013.

[30] **Álvarez Domínguez, Servando, et al.** Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas. 2008.

[31] **Ministro de Industria, turismo y comercio**. Real Decreto 138/2011, de 4 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus construcciones técnicas complementarias.

[32] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. Factores de conversión a energía primaria (EP) y factor de emisión de CO₂ para carburantes, usos térmicos y electricidad. 2008.

[33] **Ciatesa y la Universidad Politécnica de Valencia**. Manual de usuario: Geo Ciatesa. 2004.

[34] **Internacional Ground Source Heat Pump Association**. Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems, Installation Guide. Oklahoma State University, 1988.

[35] **Ruiz, Alfredo**. Comparativa económica/ambiental de sistemas de climatización. 2014.

[36] **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**. Guía Técnica: Diseño de centrales de calor eficientes. 2010.

Proyectos Fin de Carrera

Casajuana, Damià, et al. PFC: Diseño de una instalación de climatización utilizando energía geotérmica solar en un edificio de viviendas de Terrassa. Terrassa, 2010.

García, Javier. PFC: Instalación de suelo radiante y energía solar térmica en una vivienda unifamiliar. 2012.

Linares, Germán. PFC: Plan de viabilidad de empresa ejecutora de estudios, proyectos y obra de eficiencia energética (geotermia). Madrid, 2010.

López, Cristian. PFC: Diseño, dimensionamiento y viabilidad para climatización por geotermia de una vivienda unifamiliar. Valladolid, 2011.

Marrero, Julio. PFC: Calefacción mediante suelo radiante. Madrid, 2009.

Ruiz, Jorge. PFC: Climatización de un bloque de 46 viviendas mediante suelo radiante dinámico. Madrid, 2009.

Sanz, Carlos. PFC: Climatización geotérmica de un edificio. Madrid, 2010.

Sitios Web

[WB1] <https://www.imf.org/> (consulta realizada 05 de Marzo del 2014)

[WB2] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/> (consulta realizada 05 de Marzo del 2014)

[WB3] <http://www.euroobserv-er.org/> (consulta realizada 07 de Marzo del 2014)

[WB4] <http://www.idae.es/> (consulta realizada 08 de Marzo del 2014)

[WB5] <http://www.segotermiainstalaciones.com/> (consulta realizada 23 de Marzo del 2014)

[WB6] <http://www.iat.es/> (consulta realizada 25 de Marzo del 2014)

[WB7] <http://www.aemet.es/> (consulta realizada 01 de Abril del 2014)

[WB8] <http://www.igme.es/> (consulta realizada 02 de Abril del 2014)

[WB9] <http://www.saunierduval.es/> (consulta realizada 11 de Abril del 2014)

[WB10] <http://www.ecoinnova.com/> (consulta realizada 12 de Abril del 2014)

[WB11] <http://www.tiemme.com/es/> (consulta realizada 12 de Abril del 2014)

[WB12] <http://old.giacomini.com/es/> (consulta realizada 13 de Abril del 2014)

[WB13] <http://ecoforest.es/espanol/index.php> (consulta realizada 27 de Abril del 2014)

[WB14] <http://www.dinagas.es/> (consulta realizada 30 de Abril del 2014)

[WB15] <http://www.grupociat.es/> (consulta realizada 08 de Mayo del 2014)

Software utilizado

Autocad 2014

Catia v5

CalculoAire

Suelo Radiante

Geo Ciatesa

Microsoft Word

Microsoft Excel