



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una instalación geotérmica para el edificio Isaac Peral
en la Escuela Naval Militar*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO:	Ramón De Meer Méndez
DIRECTORES:	Lara Febrero Garrido Jose Ignacio Iglesias Prado
CURSO ACADÉMICO:	2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de una instalación geotérmica para el edificio Isaac Peral
en la Escuela Naval Militar*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La climatización de edificios públicos mediante combustibles fósiles constituye uno de los principales retos de la transición energética en el sector terciario. En este contexto, el presente trabajo desarrolla el diseño de una instalación de bomba de calor geotérmica de muy baja entalpía con captación horizontal en circuito cerrado para el edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar de Marín, cuyo sistema de calefacción basado en gas natural presenta una tendencia creciente de consumo y una antigüedad próxima al fin de su vida útil. A partir de la caracterización térmica del edificio y del subsuelo granítico de la Ría de Pontevedra, se dimensionan los elementos principales de la instalación: la bomba de calor, el captador horizontal y el sistema de distribución interior mediante fancoils. Los resultados muestran que la instalación propuesta es técnicamente viable, cumple los límites normativos de la VDI 4640 y la Guía Técnica IDAE, y permite reducir las emisiones de CO₂ del edificio en más de un 80% respecto al sistema actual, contribuyendo a los objetivos de descarbonización establecidos en la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD) 2024/1275 y la Directiva AJEMA 2/2026. Se incluye asimismo un estudio económico que evalúa el período de retorno de la inversión en distintos escenarios de precios de la energía y de financiación pública mediante fondos FEDER para la Administración General del Estado.

PALABRAS CLAVE

Geotermia de muy baja entalpía, bomba de calor, captación horizontal, grados-día, emisiones.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a María que me ha apoyado de forma incondicional a lo largo de todo este período de formación en la Escuela Naval Militar, a mi familia, quienes siempre han estado allí para resolver cualquier tipo de dudas, pero, sobre todo, para que no pierda mi vocación. Por último, agradecer a la constructora SOLDESER por el consejo dado en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Metodología	8
2 Estado del arte	10
2.1 La Geotermia.....	10
2.2 Clasificación de recursos geotérmicos	11
2.2.1 Yacimientos de alta entalpía	11
2.2.2 Yacimientos de media entalpía	11
2.2.3 Yacimientos de baja entalpía	11
2.2.4 Yacimientos de muy baja entalpía	12
2.3 La geotermia en España	12
2.4 Instalaciones geotérmicas de muy baja entalpía	14
2.4.1 Sistema de captación horizontal en circuito cerrado	15
2.4.2 Sistema de captación vertical en circuito cerrado (sondas geotérmicas).....	15
2.4.3 Sistema de captación en circuito abierto (agua subterránea)	16
2.5 El terreno como fuente de energía: comportamiento térmico del subsuelo	16
2.6 El circuito de captación horizontal.....	17
2.6.1 Materiales y diámetros de las tuberías	17
2.6.2 Fluido portador: anticongelante y propiedades	17
2.7 Configuraciones de la captación horizontal	18
2.7.1 Disposición en zanjas con tuberías paralelas	18
2.7.2 Captadores tipo Slinky horizontal	18
2.7.3 Captadores tipo Slinky vertical.....	19
2.8 Configuración hidráulica: serie y paralelo	19
2.9 La bomba de calor geotérmica	20
2.9.1 La bomba de calor reversible.....	21
2.9.2 El Coeficiente de rendimiento (COP).....	22
2.9.3 Las bombas de calor geotérmicas según el medio	24
2.10 Circuito de distribución interior	24
2.10.1 Suelo radiante	25

2.10.2 Fancoils	25
2.10.3 Radiadores	26
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Descripción del edificio de estudio	27
3.1.1 Generalidades	27
3.1.2 Sistema de calefacción actual y consumos reales.....	28
3.2 Estimación de la demanda térmica.....	30
3.2.1 Fundamento físico del método de grados-día	30
3.2.2 Cálculo del coeficiente global de pérdidas térmicas UA	31
3.2.3 Datos climáticos de Marín: temperatura media mensual y grados-día.....	32
3.2.4 Demanda bruta de calefacción por el método de grados-día	33
3.2.5 Factor de utilización (Fu) y demanda real corregida	34
3.2.6 Estimación de la demanda de refrigeración	35
3.3 Cálculo de la potencia punta y selección de la bomba de calor	36
3.3.1 Cálculo de la potencia punta	36
3.3.2 Criterios de subdimensionamiento de la bomba de calor	36
3.3.3 Selección del modelo de la bomba de calor.....	37
3.3.4 Resumen de los parámetros de selección.....	38
3.3.5 Configuración de las bombas.....	38
3.4 Estudio del terreno	39
3.4.1 Metodología de caracterización del subsuelo	39
3.4.2 Litología del subsuelo, granito de la Ría de Pontevedra.....	40
3.4.3 Temperatura del terreno no perturbado	40
3.4.4 Tipo de suelo y extracción térmica	41
3.4.5 Justificación del valor de extracción específica adoptado	41
3.4.6 Limitaciones del método y necesidad del TRT	42
3.5 Dimensionamiento del captador geotérmico horizontal	42
3.5.1 Datos de partida para el dimensionamiento	42
3.5.2 Horas de funcionamiento anuales.	43
3.5.3 Balance de la bomba de calor	43
3.5.4 Cálculo de la superficie de captación	43
3.5.5 Cálculo de la longitud de tubería	44
3.5.6 Configuración geométrica del captador.....	44
3.5.7 Verificación del límite de extracción específica anual	45
3.6 Especificaciones técnicas de los componentes del captador.....	45
3.6.1 Tubería PE-100 PN10 DN32	45

3.6.2 Fluido caloportador: agua con monopropilenglicol al 25%.....	46
3.6.3 Colectores de distribución (manifolds).....	46
3.7 Distribución interior: sistema de fancoils	47
3.7.1 Justificación de la solución adoptada.....	47
3.7.2 Implicación del fancoil en el COP de la bomba de calor.....	47
3.7.3 Características técnicas de los fancoils	48
3.7.4 Distribución de unidades por potencia y espacio.....	48
3.7.5 Red hidráulica interior	49
4 Resultados	50
4.1 Resumen de los resultados	50
4.2 Análisis de los resultados	51
4.2.1 La demanda térmica.....	51
4.2.2 Selección de la bomba de calor geotérmica.....	51
4.2.3 Captador geotérmico horizontal.....	52
4.2.4 Fancoils.....	52
4.3 Validación frente a los límites normativos.....	52
4.4 Comparación con estudios previos del Isaac Peral	52
4.5 Análisis del ahorro energético y reducción de emisiones de CO ₂	53
4.5.1 Consumo eléctrico de la bomba de calor	53
4.5.2 Comparación de consumo con el sistema actual	54
4.6 Discusión sobre las limitaciones del método	54
4.6.1 Método de grados-día	54
4.6.2 Caracterización del subsuelo	55
4.6.3 Simplificaciones en el cálculo de la potencia punta	55
4.7 Estimación del coste de la instalación.....	55
4.8 Período de retorno de la inversión	57
4.9 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía	58
5 Conclusiones y líneas futuras	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Líneas futuras	60
6 Bibliografía.....	62
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	65
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	67
Anexo III: Ficha técnica de la bomba de calor.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Mapa de flujo de calor en superficie de la Península Ibérica. (Fuente: [21])	13
Figura 2-2 Variación de la temperatura de la Tierra en función de la profundidad a lo largo de un año. (Fuente: [3])	14
Figura 2-3 Tipos de sistemas de captación. (Fuente: [22])	14
Figura 2-4 Esquema de la instalación geotérmica horizontal. (Fuente: [23])	15
Figura 2-5 Esquema de la instalación de captación vertical. (Fuente: [23])	16
Figura 2-6 Ejemplo de captador horizontal tipo Slinky. (Fuente: [24])	18
Figura 2-7 Configuración en serie vertical. (Fuente: [1])	19
Figura 2-8 Sistema en paralelo vertical. (Fuente: [1])	19
Figura 2-9 Ciclo de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica. (Fuente: [25])	20
Figura 2-10 Ciclo de calefacción de la instalación geotérmica horizontal. El terreno actúa como foco frío ($T \approx 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y los fancoils como foco caliente ($T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$). (Fuente: elaboración propia)	22
Figura 2-11 Ciclo de refrigeración de la instalación geotérmica horizontal. La válvula de 4 vías invierte el sentido del ciclo: el edificio actúa como foco frío y el terreno como foco caliente. (Fuente: elaboración propia)	23
Figura 2-12 Ciclo frigorífico de la bomba de calor en diagrama Presión-Entalpía. Izquierda: ciclo ideal. Derecha: ciclo real con vapor sobrecalentado en el punto 2. (Fuente: [1])	23
Figura 2-13 Suelo radiante. (Fuente: [27])	25
Figura 2-14 Esquema de funcionamiento de un fancoil. (Fuente: [28])	26
Figura 2-15 Esquema de radiador para su uso en una instalación geotérmica. (Fuente: [29])	26
Figura 3-1 Vista aérea del Isaac Peral y alrededores. (Fuente: [30])	27
Figura 3-2 Edificio Isaac Peral	28
Figura 4-1 Esquema de la instalación geotérmica. (Elaboración propia a partir de [30])	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Relación del COP en función de la temperatura de impulsión interior. (Fuente: elaboración propia basado en [3], [9])	24
Tabla 3-1 Consumo mensual de gas natural del edificio Isaac Peral (año 2018). (Basado en: Oficina de mantenimiento ENM [7])	29
Tabla 3-2 Coeficiente global de pérdidas térmicas UA del edificio Isaac Peral	32
Tabla 3-3 Grados-día lectivos mensuales de Marín. (Elaboración propia a partir de datos AEMET [12])	33
Tabla 3-4 Demanda bruta mensual de calefacción.	33
Tabla 3-5 Demanda real mensual de calefacción con factor de utilización Fu. (Fuente: elaboración propia a partir de [3])	34
Tabla 3-6 Resumen de parámetros que debe cubrir la bomba de calor	38
Tabla 3-7 Propiedades termofísicas del granito húmedo. (Tomada de: [15])	40
Tabla 3-8 Extracción térmica específica para captación horizontal. (Tomada de: [7])	41
Tabla 3-9 Datos de partida para el dimensionamiento del captador horizontal	42
Tabla 3-10 Parámetros geométricos del captador horizontal	45
Tabla 3-11 Verificación de los límites de la norma VDI 4640	45
Tabla 3-12 Especificaciones técnicas de la tubería del captador PE-100 PN10 DN32. (Tomado de: [17])	46
Tabla 3-13 Propiedades del fluido caloportador. (Tomado de: [1])	46
Tabla 3-14 Parámetros hidráulicos del circuito de captación	47
Tabla 3-15 COP de la bomba de calor geotérmica según el sistema de emisión interior. (Tomado de: [1], [7])	48
Tabla 3-16 Parámetros de diseño del circuito de fancoils	48
Tabla 3-17 Distribución estimada de fancoils por zonas	49
Tabla 4-1 Resumen de resultados del dimensionamiento de la instalación geotérmica	50
Tabla 4-2 Verificación de los límites normativos de la instalación	52
Tabla 4-3 Comparación de consumo energético y emisiones de CO ₂ . (Tomado de: [3] [23])	54
Tabla 4-4 Estimación del coste total de la instalación geotérmica por partidas. (Tomado de: precios de mercado 2025. IVA no incluido)	55
Tabla 4-5 Costes anuales de operación y mantenimiento comparados. (Tomado de: precios energía: gas 0,065 €/kWh, electricidad 0,18 €/kWh para 2025)	56
Tabla 4-6 Período de retorno simple en función del escenario de reducción de inversión y consumo ..	57
Tabla 4-7 Análisis de sensibilidad del período de retorno frente a precios de la energía. (Fuente: elaboración propia a partir de [34], [35])	58
Tabla A3-1 Características técnicas de la bomba de calor Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai. (Tomado de: Waterkotte GmbH [33]. Los valores corresponden a las condiciones de ensayo normalizadas W10/W35 según EN 14511)	69

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La energía geotérmica es aquella que se obtiene aprovechando el calor almacenado en el subsuelo terrestre, cuya temperatura permanece prácticamente constante a lo largo del año a partir de una profundidad de 10-15 m, con independencia de las condiciones climáticas exteriores [1]. Este recurso renovable se clasifica en función de su temperatura en cuatro categorías: alta entalpía ($T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), utilizada para generación eléctrica directa; media entalpía (90-150 $^{\circ}\text{C}$), aplicable en ciclos binarios y usos industriales; baja entalpía (30-90 $^{\circ}\text{C}$), orientada a la calefacción distrital; y muy baja entalpía ($T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), que es la categoría de interés para el presente trabajo y que se explota mediante bombas de calor geotérmicas para la climatización de edificios [2]. Las instalaciones de muy baja entalpía no requieren perforaciones profundas ni fluidos geotérmicos a presión: se basan en la estabilidad térmica natural del subsuelo superficial para extraer o ceder calor a través de un circuito cerrado de tuberías, logrando rendimientos estacionales muy superiores a los de cualquier sistema convencional de calefacción, con valores de COP entre 3 y 5 en condiciones reales de operación [1].

Desde el punto de vista termodinámico, la bomba de calor geotérmica opera mediante un ciclo de compresión de vapor en el que el fluido refrigerante absorbe calor del terreno en el evaporador y lo cede al circuito de calefacción en el condensador, siendo el compresor el único elemento que consume energía eléctrica. La ventaja fundamental respecto a una caldera de gas radica en que el sistema no genera calor, sino que lo transporta: por cada kilovatio eléctrico consumido, se transfieren entre 3 y 5 kilovatios térmicos al edificio, siendo el resto energía gratuita procedente del subsuelo [2]. Esta característica hace de la geotermia de muy baja entalpía la tecnología de climatización con mayor eficiencia energética disponible en la actualidad para edificios del sector terciario, especialmente en climas oceánicos como el de Marín donde la demanda de refrigeración es reducida y la temperatura del subsuelo es favorable durante todo el año.

El sector de la edificación es responsable del 40% del consumo energético total en la Unión Europea y del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero, constituyendo el ámbito prioritario para la descarbonización en el horizonte de la neutralidad climática para 2050 [3]. La crisis energética de 2021-2022, que elevó el precio del gas natural hasta cuatro veces su valor habitual en los mercados europeos, puso de manifiesto la vulnerabilidad estructural de los edificios que dependen de este combustible para su climatización y reforzó la urgencia de la transición hacia sistemas basados en energía renovable. En este marco, la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios [3] obliga a los Estados miembros a reducir progresivamente las emisiones del parque edificatorio, con especial atención a los edificios públicos por su papel de referencia institucional y por la mayor facilidad de planificación de inversiones a largo plazo en el sector público [3]. España, a través del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030, ha fijado el objetivo de incrementar en un 30% la capacidad instalada de geotermia e

impulsar la electrificación de la demanda térmica en el sector terciario [4], estableciendo además mecanismos de financiación pública a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia con fondos NextGenerationEU para instalaciones de energías renovables en edificios públicos.

En este contexto nacional y europeo, el edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar (ENM) presenta una necesidad concreta y urgente de renovación de su sistema de climatización. El edificio, construido en la década de 1960 y destinado a actividades docentes del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM), cuenta con una superficie útil de aproximadamente 2.100 m² distribuidos en dos plantas albergando aulas, laboratorios y despachos de uso diario durante el curso académico. El sistema de calefacción actual, basado en una caldera de gas natural con una antigüedad superior a 15 años, se encuentra próximo al fin de su vida útil prevista, lo que hace inevitable su sustitución en el corto o medio plazo. Dado que la caldera actual necesita sustitución a corto plazo, parte de la inversión en la instalación geotérmica sustituye un gasto que se produciría de todos modos, lo que reduce el sobre coste real respecto a una renovación convencional.

Más relevante aún que el estado del equipo actual es la tendencia de consumo del edificio. El gasto real de gas del Isaac Peral ha experimentado un crecimiento continuo y preocupante: de 117.390 kWh en 2018 a 153.500 kWh en 2025, un incremento del 30,7% en siete años que no encuentra explicación en cambios de uso del edificio y que supone un coste energético creciente para el presupuesto de la ENM [5]. Los datos de enero y febrero de 2026 superan ya los valores de esos mismos meses en 2025, confirmando que la tendencia no se ha invertido. Esta situación, de no corregirse, implicará un gasto energético anual creciente a lo largo de toda la vida útil del sistema de climatización que se instale, con la agravante de que el precio del gas natural es estructuralmente volátil y está sujeto a la dependencia de las importaciones. La instalación geotérmica elimina completamente esta exposición al precio del gas y estabiliza los costes de operación a largo plazo, puesto que el único insumo energético de la bomba de calor es la electricidad, cuyo precio tenderá a reducirse en términos reales con el incremento de la generación renovable previsto en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [4].

El recinto de la ENM dispone de una zona de uso deportivo y de instrucción adyacente al edificio Isaac Peral, la pista militar, con una superficie de aproximadamente 3.600 m², suficiente para albergar el captador geotérmico horizontal necesario sin interferir con las actividades habituales del recinto. El subsuelo de esta zona está constituido por granito hercínico de la Ría de Pontevedra, caracterizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en la hoja 185 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) [6], con propiedades termofísicas favorables para la captación horizontal: conductividad térmica estimada entre 2,5 y 3,5 W/(m·K) y capacidad calorífica volumétrica elevada, valores que sitúan al granito húmedo de Marín entre los substratos más adecuados para esta tecnología según la norma VDI 4640 [7]. La proximidad al estuario y el clima oceánico atlántico de Marín garantizan además una recarga térmica del suelo eficaz durante los meses estivales, favoreciendo la recuperación del terreno tras la extracción invernal de calor y asegurando la sostenibilidad a largo plazo del captador.

Desde el punto de vista institucional, el Ministerio de Defensa está comprometido con la integración de criterios de sostenibilidad ambiental en la gestión de sus instalaciones e infraestructuras. Este compromiso tiene su origen en la Directiva 107/1997 del Ministro de Defensa, que estableció la política medioambiental del Departamento basada en el concepto de desarrollo sostenible y compatible con la misión de las Fuerzas Armadas, e impulsó la implantación de Sistemas de Gestión Ambiental basados en la norma ISO 14001 en los establecimientos militares [8]. Esta línea de actuación fue reforzada por la Instrucción 56/2011 del Secretario de Estado de Defensa sobre sostenibilidad ambiental y eficiencia energética, que fijó objetivos concretos de reducción del consumo energético en las instalaciones del Departamento [9]. En el ámbito específico de la Armada, la Directiva AJEMA 2/2026 establece las líneas de actuación vigentes en materia de medio ambiente y eficiencia energética aplicables a las instalaciones y unidades navales en tierra [10]. El presente trabajo responde directamente a este mandato institucional: la sustitución del sistema de gas del Isaac Peral por una instalación geotérmica reduciría significativamente las emisiones de CO₂ del edificio, contribuyendo de forma cuantificable a los objetivos medioambientales de la Armada.

Desde el punto de vista económico, la viabilidad de cualquier instalación de energías renovables en un edificio del sector público no depende únicamente de su factibilidad técnica, sino también de su justificación económica ante los órganos de gestión presupuestaria. En el caso de la geotermia horizontal en edificios existentes, el coste de la obra civil de excavación y reposición de la superficie representa la partida dominante y condiciona en gran medida el período de retorno de la inversión. El presente trabajo incluye un estudio económico completo que proporciona a los responsables de la ENM la información necesaria para fundamentar una eventual decisión de inversión, con especial atención al análisis de sensibilidad frente a la variación de los precios de la energía y a las posibilidades de financiación pública disponibles para edificios de la Administración General del Estado.

El interés por la aplicación de la geotermia de muy baja entalpía en las instalaciones de la ENM no es nuevo en el ámbito del CUD-ENM. Rubiera Quesada analizó en 2016 la viabilidad de una instalación hidrotérmica para el mismo edificio mediante simulación dinámica con TRNSYS, obteniendo una demanda de calefacción de 87.000 kWh/año [11]; Sánchez-Ferragut Guitart realizó en 2019 un estudio de optimización energética del Isaac Peral que caracterizó en detalle la envolvente del edificio mediante simulación dinámica y la calibró frente a los consumos reales de gas [12]; y Díaz del Río Oleaga y De las Heras Gutiérrez analizaron soluciones geotérmicas para el cuartel Francisco Moreno, también en la ENM [15] [16]. El presente trabajo se apoya en los datos constructivos verificados en estos estudios previos, adopta los valores de transmitancia de la envolvente de Sánchez-Ferragut y propone por primera vez el diseño completo de un captador geotérmico horizontal en circuito cerrado para el Isaac Peral, con el objetivo de proporcionar a la ENM un documento técnico de referencia que sirva de base para un futuro proyecto ejecutivo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es el diseño de una instalación geotérmica de muy baja entalpía para la climatización del edificio Isaac Peral dentro de la Escuela Naval Militar, que permita cubrir su demanda de forma eficiente y sostenible y que sustituya al actual sistema de caldera de gas natural.

Para alcanzar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Conocer la demanda térmica real del edificio Isaac Peral, tanto de calefacción como de refrigeración, a partir de sus características físicas y la influencia del clima reinante.
- Seleccionar la bomba de calor geotérmica que mejor se adapte a las necesidades del edificio en términos de eficiencia, potencia y compatibilidad con el sistema de distribución interior.
- Determinar las características del subsuelo de la parcela y su idoneidad para albergar un captador geotérmico horizontal.
- Dimensionar el captador geotérmico horizontal y verificar que cumple con los requisitos normativos de sostenibilidad térmica a largo plazo.
- Diseñar el sistema de distribución interior y justificar la solución adoptada frente a distintas alternativas disponibles.
- Evaluar el impacto energético, ambiental y económico de la instalación frente al sistema actual de gas natural.

1.3 Metodología

El desarrollo del TFG sigue una metodología de diseño ingenieril secuencial en la que cada etapa toma como datos de entrada los resultados de la anterior. El proceso se puede estructurar en siete fases.

Fase 1: Recopilación de datos de partida. Se han recopilado los datos constructivos del edificio Isaac Peral a partir de estudios previos realizados en el CUD-ENM, en particular, los valores de transmitancia térmica de la envolvente obtenidos y verificados por Sánchez-Ferragut Guitart [12] mediante simulación y calibración frente a consumos reales. Los datos de consumo real de gas natural han sido facilitados por la propia ENM [5].

Fase 2: Estimación de la demanda térmica. Se ha aplicado el método de los grados-día sobre el coeficiente global de pérdidas UA del edificio, utilizando los datos climatológicos de la estación de Marín de Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la serie 1981-2010 [15]. La demanda térmica bruta se ha corregido con el factor de utilización siguiendo la metodología de la Guía Técnica Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [1]. La demanda de refrigeración se ha estimado mediante el método simplificado de transmisión con reducción por inercia térmica.

Fase 3: Selección de la bomba de calor. A partir de la potencia punta de calefacción calculada según la norma UNE-EN 12831 [16] y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [17], se ha dimensionado la bomba de calor aplicando el criterio habitual de cobertura del 80-85 % de la carga punta en edificios con un uso discontinuo.

Fase 4: Caracterización del terreno. Se ha caracterizado el subsuelo de la parcela mediante consulta de la hoja 185 del Mapa Geológico Nacional MAGNA del IGME [6] identificando el granito húmedo hercínico como material dominante. Las propiedades termofísicas y valores de extracción específica se han obtenido de las tablas de la norma Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4640 [9] [20].

Fase 5: Dimensionamiento del captador. Se ha calculado la superficie de captación necesaria a partir de la potencia a extraer del terreno y la extracción específica admisible según VDI 4640 y aplicando el factor corrector por operación reversible recogido en la Guía IDAE [1]. Se ha verificado el cumplimiento del límite de extracción anual de 70 kWh/(m²·año).

Fase 6: Diseño de la distribución interior. Se ha justificado la selección del sistema de fancoils frente al suelo radiante y los radiadores por razones técnicas y económicas, y se ha dimensionado la red de unidades terminales por zonas funcionales del edificio, determinando el número de unidades necesarias y su distribución en planta.

Fase 7: Estudio económico. Se ha realizado un estudio económico comparativo entre el sistema actual de caldera de gas y la instalación geotérmica propuesta, cuantificando el coste estimado de la instalación, el ahorro anual en costes energéticos y de mantenimiento, y el período de retorno de la inversión. Se incluye un análisis de sensibilidad frente a variaciones en los precios de la energía y en el nivel de financiación pública disponible para edificios de la Administración General del Estado.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 La Geotermia

La energía geotérmica se define como aquella energía térmica que se encuentra en el interior de la Tierra, bajo la superficie sólida y originada principalmente por el calor residual de la formación del planeta y se manifiesta en manantiales o erupciones volcánicas. Comprende, en definitiva, aquellos procesos que buscan aprovechar dicha energía. Consiste en sí en una energía renovable manifestada en gradientes térmicos, donde la temperatura aumenta en, aproximadamente, 3 °C por cada 100 m de profundidad, aunque varía en función de la geología local. Este manto se clasifica por la temperatura en recursos de alta entalpía (>150 °C) que se usa en la generación eléctrica, media (90-150 °C) y baja (30-90 °C) para usos directos térmicos y muy baja (<30 °C) para aplicaciones directas con bombas de calor geotérmico. Su explotación implica la extracción de fluidos geotérmicos tales como agua o vapor o el uso indirecto del suelo como intercambiador térmico.

El aprovechamiento de la energía geotérmica se realiza mediante perforaciones en el terreno para acceder así a los recursos térmicos subterráneos. En el proceso de alta entalpía, se inyecta agua fría a través de pozos de producción hasta las capas profundas donde se calienta el fluido debido al gradiente térmico natural; luego, esta agua o vapor asciende por otro pozo utilizándose para generar electricidad al impulsar turbinas conectadas a generadores, o bien para transferir calor directamente en sistemas de calefacción o refrigeración. Para temperaturas más bajas, se emplean bombas de calor geotérmicas que extraen el calor del suelo superficial sin necesidad de fluidos geotérmicos profundos, circulando un fluido refrigerante en circuitos cerrados para climatizar edificios de manera eficiente.

Desde un enfoque termodinámico y ambiental, la geotermia, es una energía renovable e inagotable, pues el calor terrestre está en continua regeneración. Ofrece superioridad sobre fuentes intermitentes como solar o eólica. Económicamente, reduce consumos globales en 30-70% al integrar calefacción, refrigeración existiendo también la posibilidad de contar con agua caliente sanitaria (ACS) en un mismo sistema. Ambientalmente, minimiza impacto visual, paisajístico y acústico; sus emisiones de CO₂ son mínimas. Promueve la independencia energética al ser un recurso autóctono, minimizando así la dependencia de energías no renovables.

2.2 Clasificación de recursos geotérmicos

Los recursos geotérmicos se clasifican según los criterios termodinámicos de temperatura y entalpía, que están a su vez establecidos por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) [6]. Se distinguen cuatro tipos de yacimientos principales con distintas características geológicas, tecnológicas y aplicaciones específicas que determinan su viabilidad ambiental y económica.

2.2.1 Yacimientos de alta entalpía

Los recursos de alta entalpía presentan temperaturas superiores a los 150 °C y entalpía superior a 1500 kJ/kg. Este tipo de condiciones son las que permiten aprovechar estos yacimientos para la generación de electricidad.

Geológicamente, se localizan en zonas tectónicamente activas, como bordes de placas o puntos calientes volcánicos como el Cinturón de Fuego del Pacífico, Islandia, Nueva Zelanda, Italia o las Azores, donde el gradiente térmico supera los 100 °C/km debido a distintas intrusiones magmáticas o convección de fluidos hidrotermales. Las profundidades de explotación se sitúan entre los 500 y los 1500 metros.

Predominan los yacimientos hidrotermales con vapor seco o húmedo a alta presión ($P > 10$ bar) gracias a lo que se consigue la generación de energía eléctrica mediante ciclos donde el fluido se expande rápidamente produciendo vapor, aunque también pueden ser ciclos binarios, que usan fluidos orgánicos de bajo punto de ebullición para transferir de esta forma el calor a las turbinas produciendo dicha energía eléctrica. La eficiencia térmica suele estar entre el 10% y el 20%.

La principal limitación que se encuentra con este tipo de recurso energético es su disponibilidad, pues solo se encuentra en lugares concretos del planeta, restringiendo de gran manera su potencial.

Existen ejemplos como Hellisheiði en Islandia, que cubre el 30% de la demanda energética nacional con unas emisiones mínimas de CO₂.

2.2.2 Yacimientos de media entalpía

La temperatura de estos yacimientos se encuentra entre los 90 °C y los 150 °C, y la entalpía, por otro lado, entre 500 kJ/kg y 1500 kJ/kg y cuentan con gradientes moderados, entre 50 y 80 °C/km. Este tipo de recursos involucran en su mayoría agua líquida mezclada con vapor a menudo encontradas en cuencas sedimentarias.

Los fluidos geotermales en dicho rango de temperatura se emplean en su mayoría para la generación de energía eléctrica aplicando el ciclo de Rankine donde el fluido orgánico evapora a temperaturas medias para impulsar turbinas con eficacias entre el 8% y el 15%. También puede ser aprovechado dicho calor en aplicaciones industriales y de climatización de grandes edificios o de distritos urbanos.

A pesar de que el rendimiento eléctrico sea peor que el obtenido en los yacimientos de alta entalpía, este recurso es mucho más abundante y extendido a lo largo del planeta. Esto lo convierte en un protagonista en el actual crecimiento del sector geotérmico especialmente los pozos con rango inferior a los 90 °C, que pueden explotarse mediante tecnología de ciclo binario que es cada vez más asequible.

2.2.3 Yacimientos de baja entalpía

Los yacimientos de baja entalpía presentan temperaturas entre los 30 °C y los 90 °C, con entalpías menores a los 100 kJ/kg. Estos recursos no son aptos para la generación de energía eléctrica, pero representan un importante activo a la hora de aprovechar directamente su calor. Se caracterizan por flujos de agua caliente sin vapor significativo, impulsados por convección natural en rocas porosas.

Su principal aplicación consiste en la calefacción de edificios, de urbanizaciones o de distritos mediante redes de distribución de dicha agua caliente. También se puede aplicar en el ámbito de agricultura en el calentamiento de invernaderos o en balnearios y termas.

Este aprovechamiento se realiza gracias a intercambiadores de calor que transfieren la energía del fluido geotérmico a un circuito de agua, evitando un contacto directo cuando la calidad del agua geotérmica no permite su uso directo ya sea por su elevada salinidad o su contenido mineral.

2.2.4 Yacimientos de muy baja entalpía

Con temperaturas menores a 30 °C y entalpías menores a 100 kJ/kg. Este rango aglutina la mayor parte del territorio terrestre. A profundidades que superen los 20 metros, el subsuelo mantiene una temperatura estable a lo largo del año independientemente de las condiciones climáticas reinantes. En España, esta temperatura oscila entre 12 °C y 17 °C. Aunque la diferencia de temperatura respecto al ambiente no es realmente aprovechable para la calefacción sin ninguna ayuda, es suficiente para alimentar una bomba de calor geotérmica con alta eficiencia.

Dicha bomba de calor geotérmica actúa a modo de amplificador energético, extrayendo o cediendo calor al subsuelo que transforma en energía útil para la climatización y producción de agua caliente sanitaria. Es el sistema más extendido actualmente a lo largo del mundo para edificios residenciales y terciarios pues reducen el consumo energético entre un 30 % o un 40 % frente a sistemas convencionales.

2.3 La geotermia en España

La geotermia en España se encuentra en una fase de expansión incipiente, impulsada por la transición energética hacia fuentes renovables y el apoyo de fondos europeos. Aunque la capacidad instalada actualmente es limitada, está principalmente enfocada en usos térmicos de baja entalpía, se están produciendo avances significativos en exploración profunda, especialmente en regiones con alto potencial para ello, como pueden ser las Islas Canarias. Según datos recientes, la geotermia representa una oportunidad estratégica para reducir en gran medida la dependencia de combustibles fósiles, con un potencial térmico estimado en alrededor de 700 GWt [19] a nivel nacional, aunque la generación eléctrica es prácticamente nula hasta ahora. Desde el año 2024, se han activado numerosas inversiones y proyectos que marcan un punto de inflexión, alineados con el objetivo europeo de alcanzar 250 GW de capacidad geotérmica instalada para el año 2040 [19].

Actualmente, con respecto a otros países europeos, la capacidad geotérmica instalada en España es modesta. En 2024, se inauguró una nueva instalación de calefacción geotérmica distrital en Langreo, provincia de Asturias, híbrida con biomasa, contribuyendo a un total en Europa de 412 plantas del mismo tipo [19]. Por otra parte, para generación eléctrica, España se encuentra ante un proceso de inversión gracias al potencial para geotermia profunda que se encuentra en las regiones volcánicas nacionales. En términos térmicos, proyectos como el complejo geotérmico de Hunosa, provincia de Asturias, iniciado en 2006, reutiliza aguas de minas para la climatización, siendo el mayor de España con aplicaciones en edificios públicos. Según datos de Red Eléctrica de España (REE) para febrero del año 2026, la geotermia se agrupa en el apartado de “otras renovables” sin contar con un desglose específico, pero el sector renovable, instaló en 2025 8,8 GW, en su mayoría de energía solar y eólica [20].

Los avances se centran en la exploración profunda y la innovación tecnológica. El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) ha lanzado el Programa de Geotermia Profunda con un presupuesto de 120 millones de euros de los que la mitad se destinan a las Islas Canarias (15 millones por isla) [19]. Estos fondos promueven estudios de viabilidad y perforaciones para la geotermia de alta temperatura (>150 °C), dedicada a la generación eléctrica.

- Islas Canarias: Presentan un alto potencial debido a su origen volcánico. En Tenerife, ITER y DISA han obtenido 43,1 millones de euros para exploraciones en sistemas volcánicos-hidrotermales [19]. La exploración superficial comenzó en 2024 y las perforaciones profundas se iniciaron en el año 2025, con pozos de hasta 3 km de profundidad. Esta perforación supone un hito para el sector privado. Se han comenzado a su vez proyectos similares en Gran Canaria y en La Palma.

- Península: Pueden encontrarse numerosos proyectos en distintas provincias españolas. En Granada, se está desarrollando la primera planta de geotermia de alta temperatura con 10 MW, capaz de abastecer 5.000 hogares. En Asturias, el proyecto Hunosa reutiliza minas para calefacción. Se ha encontrado un gran potencial en la Garrotxa, provincia de Gerona y ya hay proyectos viables. En Madrid, la geotermia se integra en el intercambiador de Conde de Casal que estará operativo en 2027.

En 2025, Europa vivió un aumento en prospecciones donde España se encontraba presente. Globalmente, la inversión en geotermia creció, en el año 2025 en un 80%, alcanzando los 2.200 millones de dólares, incluyendo los proyectos españoles [19].

Se espera un aumento exponencial en perforaciones para 2026, con los primeros proyectos operativos entre 2028 y 2030. La primera planta en Canarias podría entrar en funcionamiento antes de 2030, contribuyendo a la meta del 100% de energías renovables en la isla de Tenerife. En Europa, REPowerEU proyecta 250 GW para 2040, haciendo hincapié en la baja entalpía para reducir las emisiones en edificios.

En la siguiente Figura 2-1, se puede observar la distribución del flujo energético en la Península Ibérica, destacando el gran potencial que ofrece el macizo galaico.

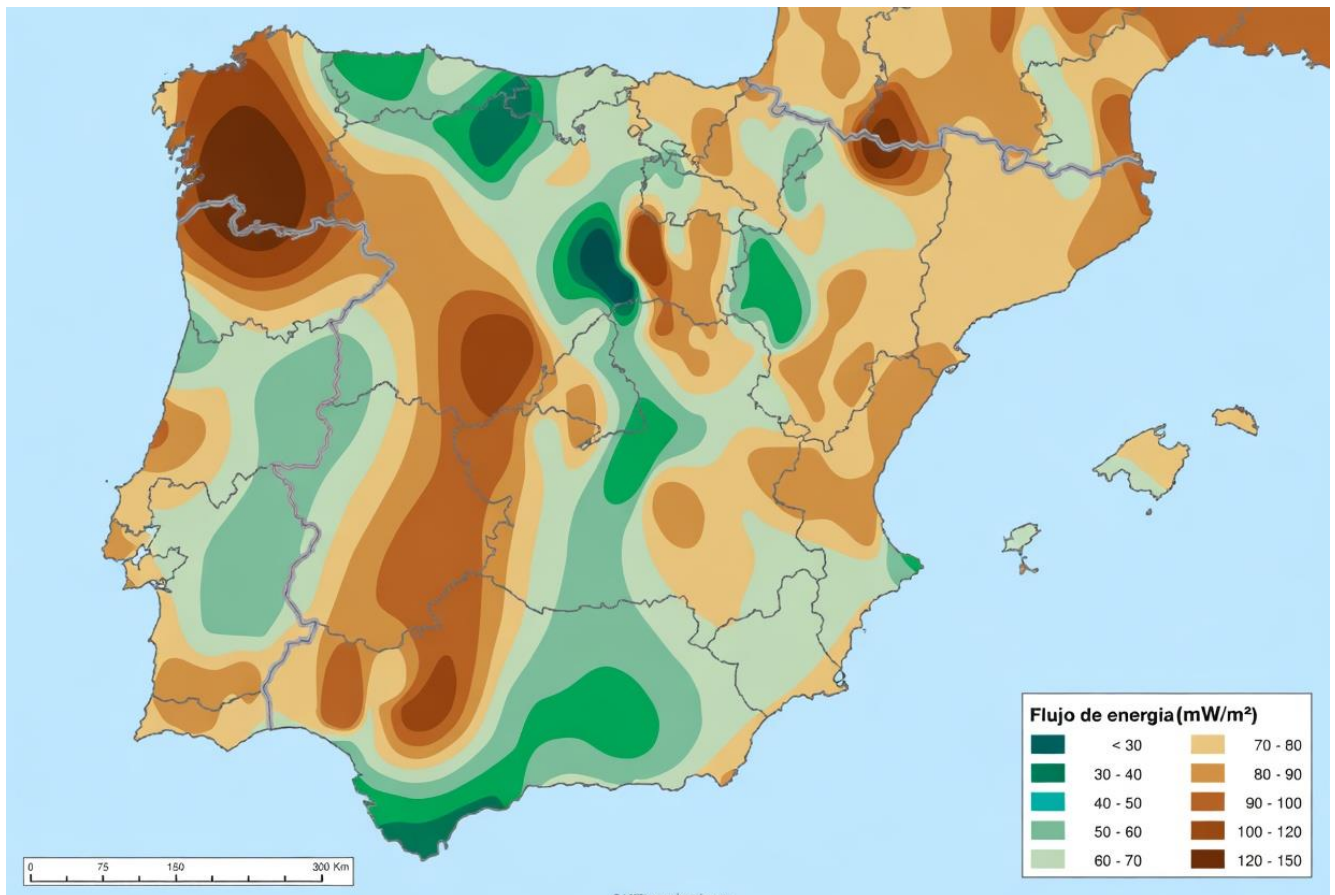


Figura 2-1 Mapa de flujo de calor en superficie de la Península Ibérica. (Fuente: [21])

2.4 Instalaciones geotérmicas de muy baja entalpía

Las instalaciones geotérmicas de muy baja entalpía son las más extendidas en el mundo y las más relevantes para el sector de la edificación. Su fundamento es la gran inercia térmica del subsuelo: a partir de los 20 metros de profundidad, la temperatura del terreno permanece prácticamente constante durante todo el año, sin verse afectada por las variaciones estacionales ni por las condiciones meteorológicas superficiales, como se puede observar en la Figura 2-2, que muestra la variación de la temperatura del terreno en función de la profundidad a lo largo de distintos momentos del año. La curva roja representa la distribución térmica correspondiente al día 30 (aproximadamente finales de enero), mientras que las curvas en magenta, azul claro y amarillo muestran dicha distribución para los días 90, 180 y 270 del año, respectivamente.

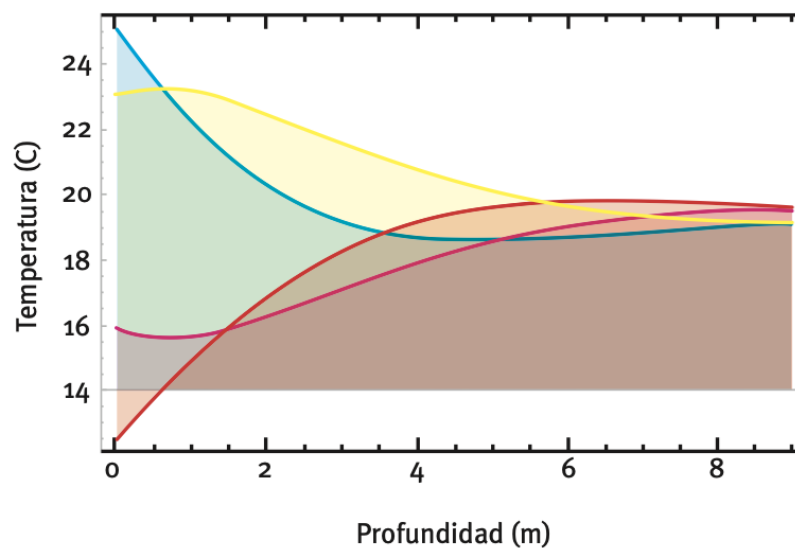


Figura 2-2 Variación de la temperatura de la Tierra en función de la profundidad a lo largo de un año. (Fuente: [3])

Una instalación geotérmica de climatización consta de tres elementos interconectados: el circuito de captación exterior (que intercambia calor con el subsuelo Figura 2-3), la bomba de calor geotérmica (que amplifica la energía extraída o cedida) y el circuito interior de distribución (que lleva la energía térmica a los diferentes espacios del edificio). El sistema es completamente reversible: en invierno opera en modo calefacción extrayendo calor del subsuelo, y en verano en modo refrigeración cediendo calor al terreno [1].



Figura 2-3 Tipos de sistemas de captación. (Fuente: [22])

2.4.1 Sistema de captación horizontal en circuito cerrado

El sistema de captación horizontal (Figura 2-4) en circuito cerrado es la solución más económica y habitual para su instalación en viviendas unifamiliares que tengan disponibilidad de terreno. Consiste en tuberías de plástico (polipropileno reticulado o polietileno de alta densidad) soterradas en zanjas excavadas a una profundidad de entre 0,6 y 1,5 metros por las que circula un fluido anticongelante, en su mayoría una mezcla de agua y glicol, que se encarga de intercambiar calor con el terreno.

La profundidad de la instalación es suficiente para que la temperatura del subsuelo no se vea influenciada por las estaciones del año y la radiación solar pero su rendimiento es menos que en los sistemas verticales. La superficie de captación necesaria es, aproximadamente, el doble a la superficie a climatizar del edificio, que para complejos de gran volumen puede resultar en varios miles de metros cuadrados, además, este terreno no puede cubrirse ni con pavimento impermeable ni plantarse vegetación con raíces profundas que puedan dañar las tuberías.

La recuperación térmica específica de este sistema se estima en torno a 10-15 W por metro de tubo soterrado y unos 39 W por metro cuadrado de terreno. Cuando el espacio disponible es limitado, o resulta insuficiente la superficie total, se pueden emplear captadores en espiral o tipo “slinky” por las que se aumenta la longitud de tubería por unidad de superficie excavada, aunque con mayor coste de material [1].



Figura 2-4 Esquema de la instalación geotérmica horizontal. (Fuente: [23])

2.4.2 Sistema de captación vertical en circuito cerrado (sondas geotérmicas)

El sistema de captación vertical (Figura 2-5) es el más eficiente y recomendado por los técnicos y es adecuado para edificios independientemente de su tamaño, desde viviendas hasta grandes centros comerciales, hospitales o instalaciones industriales. Estriba en perforaciones verticales de pequeño diámetro (130-150 mm generalmente) y alcanzan profundidades de entre 50 y 200 metros, donde se almacenan las sondas geotérmicas que están formadas por tubos plásticos de alta resistencia.

A partir de los 20 metros de profundidad, la temperatura del terreno permanece invariable y aumenta a medida que aumenta la profundidad a ritmo del gradiente geotérmico, que se puede aproximar en 3 °C cada 100 metros de excavación. De esta forma, se garantizan unas condiciones de intercambio térmico mucho más constantes que en los sistemas horizontales, con una eficiencia aproximada de 50 W por metro de sondeo. La perforación se rellena con bentonita o mezclas cementosas para asegurar un buen contacto térmico entre la sonda y el terreno circundante protegiendo así los acuíferos de posibles contaminaciones.

Los tubos en U doble son los captadores más utilizados en este tipo de instalaciones, cada sonda consiste en un par de tubos que descienden hasta la profundidad deseada regresando a la superficie, formando la U de su nombre, donde se conectan al colector general del circuito de captación vertical. También se emplean tubos coaxiales en algunas aplicaciones especiales. La distancia mínima entre sondeos debe ser de entre 5 y 6 metros para evitar cualquier tipo de interferencias térmicas entre ellos.

El tipo de suelo es determinante a la hora del diseño. Las rocas con una mayor conductividad térmica, como puede ser el granito, permiten extraer más energía por metro de sondeo mientras que sedimentos secos o arcillas presentan unos valores muy bajos. A modo de ejemplo, gravas saturadas de agua permiten extracciones de 65 a 80 W/m mientras que sedimentos secos no superan los 25 W/m [1].

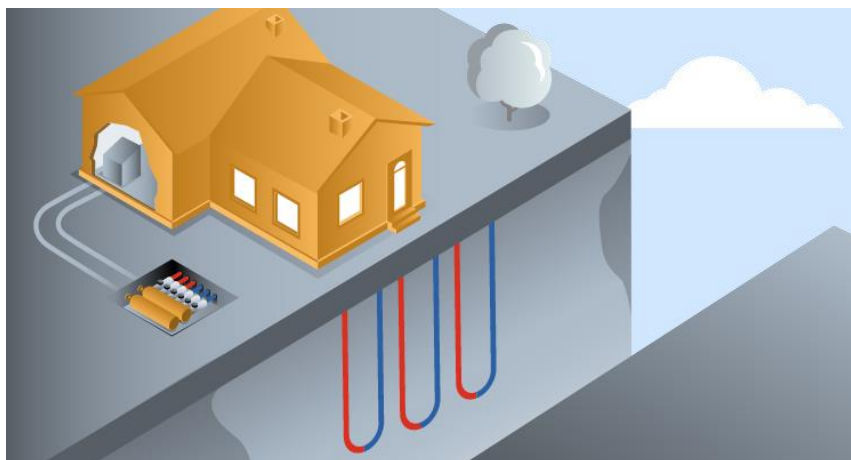


Figura 2-5 Esquema de la instalación de captación vertical. (Fuente: [23])

2.4.3 Sistema de captación en circuito abierto (agua subterránea)

Frente a los sistemas de circuito cerrado, en el circuito abierto, el fluido de trabajo consiste en la propia agua subterránea extraída directamente del acuífero. Dicha agua se bombea desde un pozo de extracción, pasa a través de la bomba de calor donde cede o absorbe calor, y se devuelve al acuífero mediante un segundo pozo de reinyección situado aguas abajo.

Este sistema aprovecha la temperatura constante del agua subterránea que en España suele encontrarse entre 12 y 17 °C, con mayor estabilidad incluso que el terreno sólido. Dado que el agua es mejor conductor térmico que el suelo, los rendimientos que se consiguen son muy altos con una menor inversión que en los sistemas cerrados pues no requieren grandes sondas geotérmicas.

Sin embargo, presenta requisitos importantes para que se pueda llevar a cabo. Es necesaria la existencia de un acuífero que tenga un caudal suficiente y de buena calidad química en la ubicación donde se pretende realizar el proyecto. La calidad del agua es un factor muy importante, pues el contenido en minerales, sales o hierro puede generar distintas incrustaciones o corrosión en los equipos de la bomba de calor. Por otra parte, se requieren permisos de uso del agua subterránea de las autoridades hidrológicas competentes añadiendo así complejidad administrativa al proyecto [1].

2.5 El terreno como fuente de energía: comportamiento térmico del subsuelo

La comprensión del comportamiento térmico del subsuelo es clave para entender por qué el sistema geotérmico funciona y cuáles son sus límites. La temperatura del suelo no es constante en todo su espesor, pues varía en función de la profundidad y el tiempo de manera muy característica.

En la capa más superficial, alrededor de los primeros 5 metros aproximadamente, la temperatura sigue variaciones diarias a consecuencia de la meteorología reinante, pero con cierto retardo y amortiguación. En la zona intermedia, entre 5 y 20 metros de profundidad, la temperatura responde principalmente a las variaciones estacionales, en verano es más fría que el aire y en invierno más cálida, actuando como regulador térmico natural. A mayores profundidades, la temperatura permanece prácticamente constante a lo largo del año, tomando un valor aproximado a la temperatura media anual de la zona. En España, este valor oscila generalmente entre 12 °C y 17 °C según la región.

Los captadores horizontales se instalan en la zona intermedia entre 0,6 y 1,5 metros de profundidad donde la temperatura varía estacionalmente, pero de forma mucho más suave que en el aire. Esto significa que en invierno el terreno a esa profundidad está significativamente más caliente que en el exterior, gracias a lo que se puede extraer calor de forma eficiente para la calefacción. En verano ocurre

lo contrario, el suelo está a una temperatura inferior al ambiente permitiendo la cesión de calor al subsuelo para refrigerar el edificio.

Un aspecto crítico es que la principal fuente de calor que alimenta a los captadores horizontales a esa profundidad no es el gradiente geotérmico del interior de la Tierra, pues su contribución es muy pequeña en los primeros metros de excavación, sino que el calor solar que se almacena en el suelo durante los meses cálidos y que se va liberando gradualmente durante el invierno. Es por ello por lo que se dice que en este tipo de sistemas el calor aprovechado es, en gran medida, calor solar almacenado en el terreno.

Esta dependencia de la radiación solar tiene una importante implicación en la práctica, la superficie de los captadores no puede pavimentarse ni cubrirse de forma impermeable pues esto impediría la recarga solar del terreno. Tampoco se pueden plantar árboles o arbustos con raíces profundas porque puedan dañar las tuberías. La cubierta ideal es el césped, plantas de pradera o arena, que dejan pasar la radiación solar y la lluvia al suelo [2].

2.6 El circuito de captación horizontal

El circuito de captación es el elemento diferencial de la instalación geotérmica horizontal. Consiste en un conjunto de tuberías de plástico de alta resistencia enterradas en el suelo a escasa profundidad, formando un intercambiador de calor de gran longitud y superficie en contacto con el terreno. A continuación se describen las especificaciones técnicas de los componentes principales del circuito de captación: la tubería y el fluido caloportador [2].

2.6.1 Materiales y diámetros de las tuberías

Las tuberías empleadas en los circuitos de captación horizontal deben cumplir unos exigentes requisitos de resistencia mecánica, elasticidad, resistencia química a los anticongelantes y estabilidad térmica a largo plazo. Los materiales más utilizados son el polietileno de alta densidad, el polietileno y el polipropileno reticulados. Estos materiales garantizan una vida útil superior a 50 años en condiciones subterráneas.

Los diámetros más comunes oscilan entre 25 mm y 40 mm para las tuberías de captación principal, aunque la Guía Técnica del IDAE establece que los captadores pueden tener diámetros de entre 1,5 y 11 cm. La elección del diámetro incide directamente en las pérdidas de presión del circuito y, por tanto, en la potencia de la bomba de circulación necesaria.

Las uniones entre tramos de tubería se realizan mediante electrosoldadura o soldadura de tope, lo que garantiza una continuidad hidráulica perfecta sin riesgo de fugas. Es fundamental que todas las uniones queden accesibles o que se minimice su número en las zonas enterradas [1].

2.6.2 Fluido portador: anticongelante y propiedades

El fluido que circula a lo largo del circuito de captación es una mezcla entre agua desmineralizada y anticongelante, necesario para evitar la congelación de las tuberías en los meses más fríos, cuando el fluido sale del captador a temperaturas cercanas a los 0 °C.

El anticongelante más recomendado en la actualidad es el propilenglicol, en una proporción típica del 25-30 % con respecto al volumen total. Esta concentración reduce el punto de congelación del fluido hasta por lo menos -14 °C, proporcionando un margen de seguridad suficiente. El propilenglicol es preferible al etilenglicol pues no es tóxico ni corrosivo y su impacto ambiental en caso de una fuga accidental es mínimo. Sin embargo, a temperaturas inferiores a -9 °C, el fluido se vuelve muy viscoso, por lo que se recomienda no operar la instalación con temperaturas inferiores a -5 °C para evitar un consumo excesivo de la bomba de circulación.

El propilenglicol al 30 %, presenta una conductividad térmica de 0,48 W/(m·K), calor específico de 3.759 J/(kg·K) y densidad de 1.052 kg/m³. Estas propiedades condicionan el caudal necesario para

transferir la potencia térmica requerida y deben tenerse en cuenta en el dimensionamiento hidráulico del circuito [2].

2.7 Configuraciones de la captación horizontal

Existen diversas formas de disponer las tuberías de captación horizontal, cada una con sus propias ventajas en cuanto a densidad de captación por metro cuadrado, facilidad de instalación y rendimiento. Las siguientes, consisten en los tipos de configuraciones para instalaciones de captación horizontal más comunes.

2.7.1 Disposición en zanjas con tuberías paralelas

Se trata de la configuración más clásica. Las tuberías se colocan en zanjas de 25-30 cm de anchura excavadas de forma mecánica y con una separación entre tuberías de al menos 30 cm. La profundidad de la instalación no debe ser inferior a 1,2 m medido entre la cota del terreno hasta la parte superior de la tubería, siendo lo más habitual usar una profundidad de 1,5 m [1].

Cuando se requiere aumentar la densidad de captación sin ampliar la superficie excavada, se pueden colocar dos tuberías en el mismo surco, pero a distintas alturas duplicando la longitud de captador por metro lineal de zanja. Tras la colocación, se rellena la zanja con el material procedente de la propia excavación evitando las piedras punzantes o de diámetro superior a 5 cm que pudieran dañar las tuberías.

2.7.2 Captadores tipo Slinky horizontal

El captador slinky (Figura 2-6) es una variante muy eficiente cuando se pretende maximizar la longitud de tubería por metro lineal de zanja. Consiste en enrollar la tubería formando espirales que se van depositando solapadas o separadas en el fondo del surco, como si se estirara un muelle, de donde viene su nombre [2].

En la modalidad de espiras superpuestas, los bucles se solapan parcialmente con un diámetro mínimo de 60 cm para que la configuración sea manejable. Esta disposición permite instalar una gran longitud de tubería en una zanja relativamente pequeña, aunque a costa de una mayor interferencia térmica entre los bucles adyacentes. El ancho del surco debe ser al menos del mismo tamaño que el diámetro de la espira más 35 cm.

En la forma de espiras separadas, los bucles se colocan sin solapamiento, con un paso entre 70-80 cm, lo que facilita la instalación sin la necesidad de instrumentos de medida (pues es la longitud equivalente a un brazo humano). Este modo es más rápido de ejecutar y presenta menor interferencia de térmica, siendo adecuada para superficies cortas o en instalaciones combinadas con captadores verticales.



Figura 2-6 Ejemplo de captador horizontal tipo Slinky. (Fuente: [24])

2.7.3 Captadores tipo Slinky vertical

Existe también la variante slinky en los captadores verticales, en ese caso, las espiras se colocan de forma vertical dentro de la zanja, girando 90° respecto a la disposición horizontal. Esta configuración ocupa menos anchura de foso, pero requiere mayor profundidad, se emplea cuando el terreno disponible es estrecho o cuando la normativa local impone restricciones a la anchura de excavación [1].

2.8 Configuración hidráulica: serie y paralelo

Los captadores de un circuito de captación pueden conectarse hidráulicamente en serie o en paralelo y la elección tiene consecuencias importantes en el funcionamiento del sistema [1].

En la configuración en serie (Figura 2-7), el fluido recorre todos los ramales de forma consecutiva. Esto simplifica la instalación garantizando un caudal igual en todo el circuito, pero generando caídas de presión elevadas cuando se trata de un circuito largo, lo que exige que las bombas de circulación sean más potentes. Se recomienda cuando el número de ramales es pequeño.

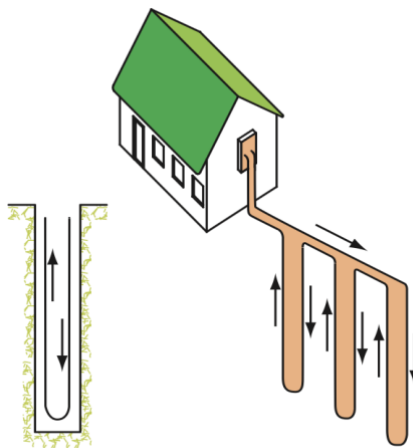


Figura 2-7 Configuración en serie vertical. (Fuente: [1])

En la distribución en paralelo (Figura 2-8), el fluido se divide en varios ramales simultáneos antes de reunirse de nuevo en el colector de retorno. Permite trabajar con menores pérdidas de presión y es la solución más habitual en instalaciones de cierta envergadura que cuentan con múltiples zanjas. El inconveniente es que requiere un buen equilibrado hidráulico entre los ramales para asegurar que todos reciben el mismo caudal, de lo contrario, unos ramales se saturarán mientras otros trabajarán por debajo de sus capacidades.

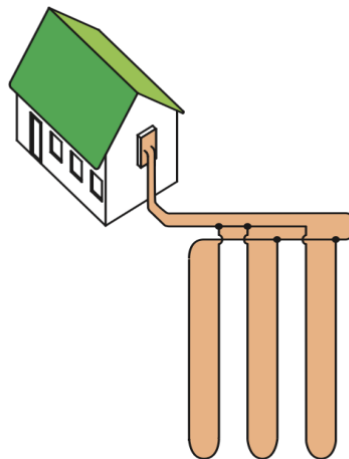


Figura 2-8 Sistema en paralelo vertical. (Fuente: [1])

2.9 La bomba de calor geotérmica

La bomba de calor geotérmica es el elemento central de cualquier instalación de climatización geotérmica de muy baja entalpía. Funciona aplicando el ciclo de refrigeración inverso: utilizando una pequeña cantidad de energía eléctrica para 'bombear' calor desde el terreno hacia el edificio (calefacción) o desde el edificio hacia el terreno (refrigeración) [2].

El ciclo completo (Figura 2-9) consta de cuatro componentes principales: el evaporador, donde el refrigerante absorbe calor del fluido portador procedente del suelo y se evapora; el compresor, que comprime el vapor de refrigerante elevando su temperatura y presión mediante energía eléctrica; el condensador, donde el refrigerante a alta presión cede su calor al circuito interior del edificio y se condensa; y la válvula de expansión, que reduce la presión del refrigerante líquido antes de volver al evaporador. Una válvula de cuatro vías permite invertir el sentido del ciclo para alternar entre calefacción y refrigeración.

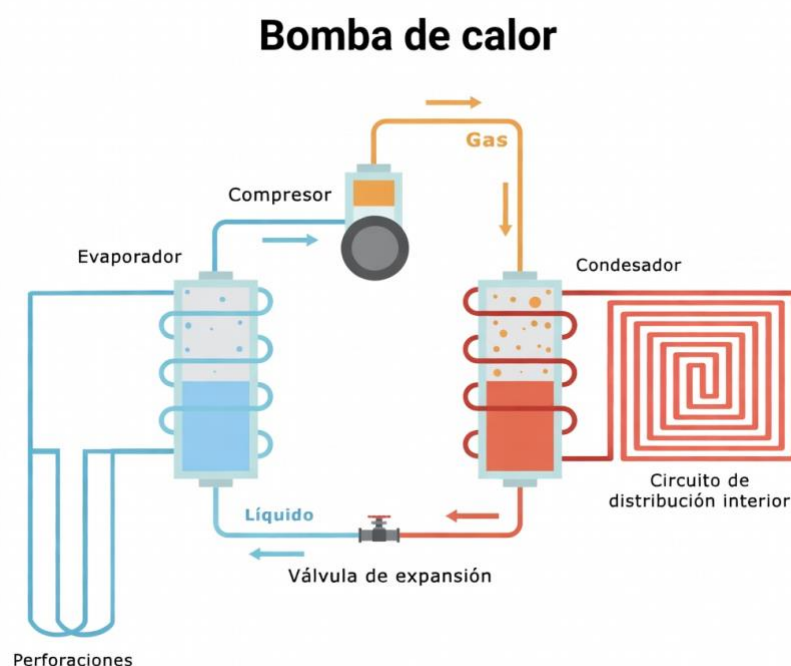


Figura 2-9 Ciclo de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica. (Fuente: [25])

La eficiencia de la bomba de calor se expresa mediante el COP (Coeficiente de Rendimiento), que representa la relación entre la energía térmica producida y la energía eléctrica consumida. Los sistemas geotérmicos alcanzan COP típicos de 3 a 5 en calefacción, lo que significa que por cada kWh eléctrico consumido se obtienen 3 a 5 kWh de calor. Esta eficiencia es muy superior a la de las bombas de calor aerotérmicas, que deben trabajar con temperaturas exteriores muy variables y en las que el rendimiento se degrada notablemente en los días más fríos del año, precisamente cuando más se necesita.

Las bombas de calor geotérmicas más habituales son del tipo agua glicolada-agua (el circuito de captación contiene mezcla anticongelante y el circuito interior usa agua), aunque también existen configuraciones suelo-agua o agua-agua. Son equipos silenciosos, compactos (se instalan en interior del edificio), muy robustos y con una vida útil superior a los 20 años.

El mercado global de las bombas de calor se encuentra en una fase de expansión acelerada, impulsada por la transición hacia sistemas de climatización sostenibles con fuertes políticas gubernamentales enfocadas en la reducción de emisiones de carbono. Según proyecciones recientes, se espera una tasa anual de crecimiento en este mercado del 12,3% [26]. Esta trayectoria refleja un incremento significativo en la adopción de bombas de calor como alternativa a sistemas tradicionales, con un claro enfoque en la eficiencia energética y la integración de energías renovables.

Los factores clave que dirigen esta evolución, los podríamos definir en los siguientes:

Demanda de sostenibilidad: La Agencia Internacional de la Energía (IEA) destaca que las bombas de calor serán fundamentales en una transición hacia un sistema de refrigeración sostenible llegando a los 2.600 GW en el año 2030, lo que supone una quinta parte de las necesidades de calefacción en edificios [26].

Eficiencia: Se espera un aumento en la demanda de sistemas híbridos y de alta eficiencia, enfatizando la reducción de la dependencia del gas natural.

Las innovaciones en tecnología de bombas de calor en el presente año 2026 se centran en mejorar la eficiencia, la adaptabilidad y la integración inteligente de las mismas, respondiendo a las demandas de sostenibilidad y de rendimiento.

Se podrían destacar las siguientes innovaciones como las más relevantes:

Bombas de calor para climas fríos: Permiten un rendimiento eficiente hasta -25 °C integrando ciclos de descongelación optimizados y refrigerantes mejorados, con coeficientes superiores a 2,4. Modelos como el Daikin FIT AURORA ofrecen calefacción y refrigeración de alta eficiencia en entornos extremos usando refrigerante R-32.

Sistemas inteligentes que integran IA: Integración de la inteligencia artificial y controles conectados para optimizar el consumo basado en patrones de ocupación, pronósticos meteorológicos y redes inteligentes. Incluyen termostatos inteligentes que ajustan el flujo variable de refrigerante para un control preciso de la temperatura.

Este tipo de innovaciones no solo elevan la eficiencia, sino que también abordan numerosos problemas como la compatibilidad climática o las posibilidades tecnológicas, posicionando a las bombas de calor como un valor clave en innovación, tecnología y eficiencia.

2.9.1 La bomba de calor reversible

Como se ha descrito anteriormente, el ciclo de la bomba de calor consta de cuatro elementos principales que trabajan de forma continua y coordinada. El evaporador es donde se produce el intercambio de calor, allí, el fluido refrigerante, a baja presión y temperatura, absorbe el calor que proviene del circuito de captación geotérmica y se evapora, pasando de líquido a gaseoso. Posteriormente, el compresor aspira el vapor y lo comprime mecánicamente, momento en el que consume energía eléctrica, elevando así su temperatura y presión hasta valores que permiten su condensación. A continuación, el fluido pasa al condensador, que consiste en otro intercambiador de calor donde el vapor a alta temperatura y presión cede su calor al circuito de distribución interior del edificio y se condensa, volviendo al estado líquido. Finalmente, la válvula de expansión reduce bruscamente la presión del refrigerante haciendo que su temperatura descienda hasta el nivel adecuado para comenzar de nuevo el ciclo en el evaporador [2].

Para que el sistema pueda alternar entre el modo de calefacción y el modo de refrigeración, se incorpora en la bomba una válvula de cuatro vías que invierten el sentido de circulación del refrigerante, cuando se usa como calefactor, el evaporador está en contacto con el circuito geotérmico y el condensador con el circuito de distribución interior del edificio, para el modo de refrigeración, se cambia el sentido del circuito [1].

2.9.2 El Coeficiente de rendimiento (COP)

El rendimiento de la bomba de calor se expresa mediante el COP y se define como la relación entre la energía térmica producida y la energía eléctrica consumida por el compresor. Un COP de 4 implica que, por cada kWh consumido, se obtienen 4 kWh de calor, de los cuales tres provienen de la energía renovable del terreno y 1 de la electricidad [1].

Matemáticamente, el COP en modo calefacción se expresa en la ecuación 1 como:

$$COP_{calefacción} = \frac{Q_{calefacción}}{W_{compresor}} \quad (1)$$

Donde $Q_{calefacción}$ es la potencia térmica entregada al circuito interior (kW) y $W_{compresor}$ es la potencia eléctrica consumida por el compresor (kW). De este balance energético se deduce mediante la ecuación 2 que el calor extraído del terreno es:

$$Q_{terreno} = Q_{calefacción} - W_{compresor} = Q_{calefacción} \times \frac{COP - 1}{COP} \quad (2)$$

Esta expresión es la que se aplica en el desarrollo del trabajo para calcular la potencia que debe extraer el captador geotérmico.

El funcionamiento de la bomba de calor en modo calefacción puede visualizarse en la Figura 2-10. El terreno actúa como foco frío a una temperatura media de 10 °C: el evaporador absorbe el calor Q_f del fluido geotérmico procedente del captador horizontal, el compresor eleva la presión y temperatura del refrigerante consumiendo un trabajo eléctrico W , y el condensador cede al circuito interior de fancoils un calor total $Q_c = Q_f + W$, siempre mayor que la energía eléctrica consumida.

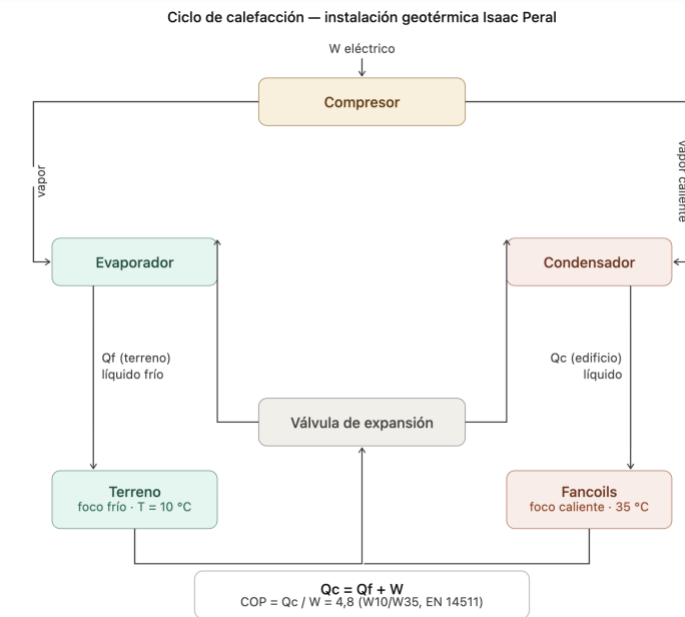


Figura 2-10 Ciclo de calefacción de la instalación geotérmica horizontal. El terreno actúa como foco frío ($T \approx 10 \text{ °C}$) y los fancoils como foco caliente ($T = 35 \text{ °C}$). (Fuente: elaboración propia)

La misma instalación puede operar en modo refrigeración durante los periodos estivales. Una válvula de 4 vías invierte el sentido de circulación del refrigerante, de forma que el evaporador pasa a absorber calor del interior del edificio —que actúa ahora como foco frío— y el condensador lo disipa al terreno, que actúa como foco caliente, tal y como se muestra en la Figura 2-11.

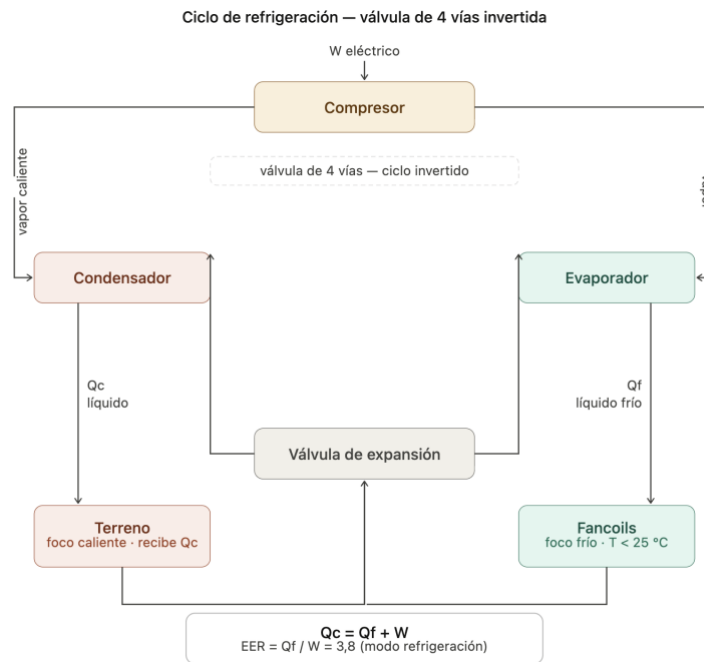


Figura 2-11 Ciclo de refrigeración de la instalación geotérmica horizontal. La válvula de 4 vías invierte el sentido del ciclo: el edificio actúa como foco frío y el terreno como foco caliente. (Fuente: elaboración propia)

El ciclo termodinámico real que sigue el refrigerante en el interior de la bomba de calor se representa en el diagrama Presión-Entalpía o diagrama de Mollier (Figura 2-12). Los cuatro puntos del ciclo corresponden a: 1→2, compresión adiabática en el compresor; 2→3, condensación a presión constante con cesión de calor Q_c ; 3→4, expansión en la válvula con caída brusca de presión; y 4→1, evaporación a presión constante con absorción de calor Q_f del terreno. En el ciclo real (diagrama derecho) el punto 2 aparece desplazado hacia la zona de vapor sobrecalentado respecto al ciclo ideal.

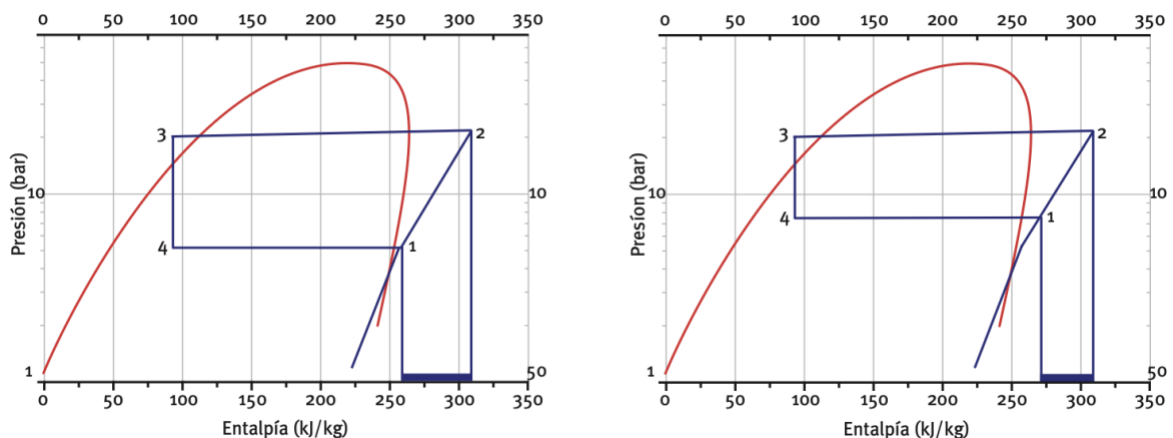


Figura 2-12 Ciclo frigorífico de la bomba de calor en diagrama Presión-Entalpía. Izquierda: ciclo ideal. Derecha: ciclo real con vapor sobrecalentado en el punto 2. (Fuente: [1])

El COP no es un valor fijo, sino que varía en función de dos temperaturas fundamentales, que son la temperatura del fluido geotérmico que entra en el evaporador y la temperatura de impulsión que se requiere en el circuito interior. Cuanto mayor sea la temperatura del terreno (foco frío) y menor sea la temperatura de impulsión interior (foco caliente), mayor será el COP. Es por eso por lo que el suelo radiante, que trabaja entre 35-40 °C, es la solución de distribución interior más eficiente cuando se combina con la geotermia, como se muestra en la Tabla 2-1.

En las instalaciones geotérmicas horizontales bien dimensionadas, los valores de COP estacional, COP medio ponderado a lo largo del año de calefacción, oscilan típicamente entre 3,5 y 4,5. Estos valores son superiores a los de las bombas de calor aerotérmicas cuyo COP se degrada severamente en los días de mayor frío.

Temperatura impulsión interior	COP aproximado
30 °C (suelo radiante óptimo)	6,2
35 °C (suelo radiante estándar)	5,2
40 °C (fancoil baja temperatura)	4,6
45 °C (fancoil / radiadores)	3,8
50 °C (radiadores convencionales)	3,4
55 °C (radiadores alta temperatura)	2,8

Tabla 2-1 Relación del COP en función de la temperatura de impulsión interior. (Fuente: elaboración propia basado en [1], [7])

2.9.3 Las bombas de calor geotérmicas según el medio

Las bombas de calor geotérmicas se clasifican generalmente indicando el medio del que se extrae el calor (foco frío) y el medio al que se cede (foco caliente). Para instalaciones horizontales en circuito cerrado, la configuración más habitual es agua-glicol, el circuito de captación lleva la mezcla de anticongelante y el circuito cerrado trabaja con agua. También existen configuraciones suelo-agua en las que el refrigerante circula directamente por el captador (expansión directa), eliminando así la necesidad del circuito de captación con fluido intermedio, aunque esta se trata de una solución menos frecuente.

2.10 Circuito de distribución interior

El circuito de distribución interior es el encargado de trasladar la energía térmica producida por la bomba de calor a los espacios del edificio. La elección del sistema de emisión es una decisión de diseño relevante en instalaciones geotérmicas, ya que la temperatura de impulsión requerida por cada sistema condiciona directamente el rendimiento de la bomba de calor: cuanto más baja es la temperatura de trabajo, mayor es el COP y menor el consumo eléctrico. Las tres alternativas más habituales son el suelo radiante, los fancoils y los radiadores de agua, cada una con sus ventajas y condicionantes en función del tipo de edificio y de las posibilidades de instalación, que se describen a continuación.

2.10.1 Suelo radiante

El suelo radiante (Figura 2-13) es el sistema de distribución interior más adecuado para combinarse con geotermia horizontal. Funciona haciendo circular agua caliente a baja temperatura por un circuito de tuberías embebido en el solado o en una capa de mortero. La gran superficie de emisión permite alcanzar el confort térmico con temperaturas de agua muy inferiores a las de los radiadores convencionales [2].

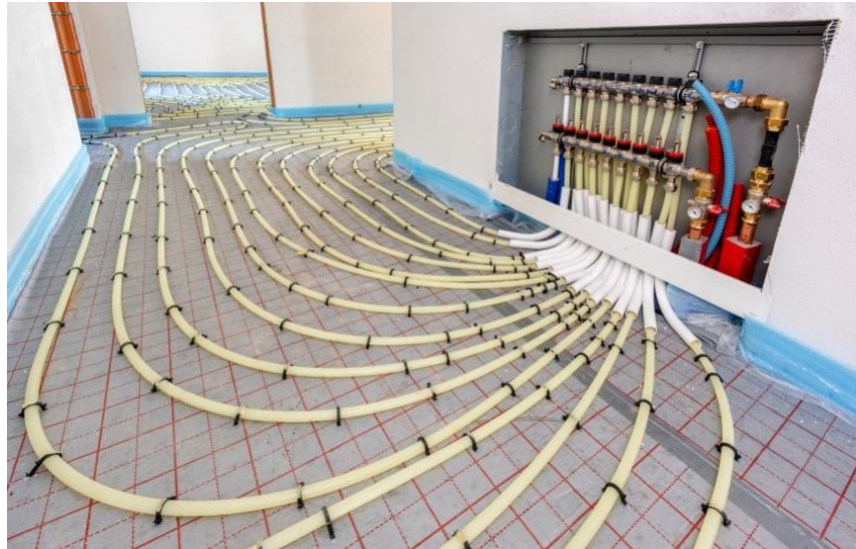


Figura 2-13 Suelo radiante. (Fuente: [27])

Precisamente estas bajas temperaturas de impulsión son las que permiten a la bomba de calor operar con el mayor rendimiento posible. Además, se trata de un sistema completamente silencioso e invisible, que calienta de forma uniforme toda la planta del edificio sin corrientes de aire y es apto tanto para calefacción como para refrigeración pues en verano es capaz de refrescar con agua entre 16-18 °C. Su principal inconveniente es que se debe diseñar e instalar durante la construcción del edificio o en reformas integrales, pues requiere levantar todo el suelo. Por este motivo, el suelo radiante queda descartado para el edificio Isaac Peral.

2.10.2 Fancoils

Los fancoils (Figura 2-14) o ventiloconvectores, son unidades terminales que impulsan el aire del local a través de un intercambiador por el que circula agua caliente o fría. Son versátiles, permiten regular la temperatura individualmente en cada estancia y admiten temperaturas de trabajo más elevadas que el suelo radiante, lo que los hace adecuados para la rehabilitación de edificios existentes donde no es posible instalar suelo radiante, como es el caso del Isaac Peral [2].

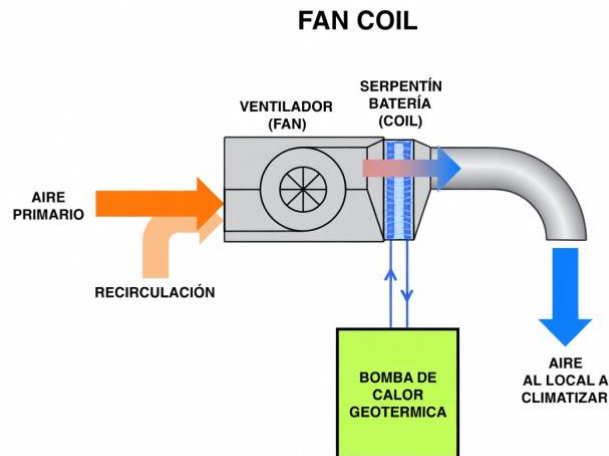


Figura 2-14 Esquema de funcionamiento de un fancoil. (Fuente: [28])

Su principal desventaja es que producen cierto ruido y circulación de aire, lo que puede ser molesto en zonas de descanso. Para maximizar el rendimiento de la bomba de calor geotérmica, es preferible emplear fancoils de baja temperatura diseñados para trabajar con agua a 40-45 °C.

2.10.3 Radiadores

Los radiadores de agua convencionales son compatibles con la bomba de calor geotérmica, aunque requieren de un diseño cuidadoso (Figura 2-15). Para que la instalación propuesta sea eficiente, los radiadores deben estar sobredimensionados, o en su defecto, ser de tipo panel de gran superficie pues de esta manera pueden emitir la potencia necesaria trabajando entre 45-50 °C. Esta solución es la más habitual en rehabilitaciones de edificios que disponen de este tipo de radiadores y simplemente se pretende sustituir la caldera por una bomba de calor geotérmica sin cambiar el sistema de distribución [2].

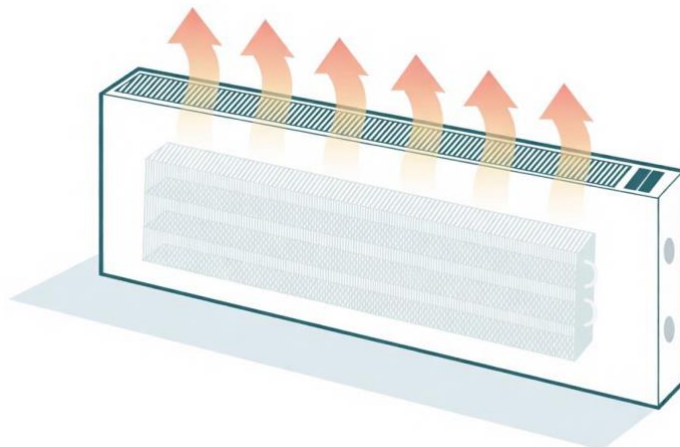


Figura 2-15 Esquema de radiador para su uso en una instalación geotérmica. (Fuente: [29])

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del edificio de estudio

3.1.1 Generalidades

El edificio Isaac Peral es una construcción de carácter docente que forma parte del conjunto de inmuebles de la Escuela Naval Militar de Marín (Figura 3-1). La ENM es el centro de formación de los oficiales de la Armada Española y está ubicada en el municipio de Marín, a orillas de la Ría de Pontevedra, en la provincia de Galicia. El complejo cuenta con instalaciones de uso diverso: aulas de enseñanza teórica, laboratorios de materias técnicas, así como despachos, seminarios y zonas de acceso y circulación.

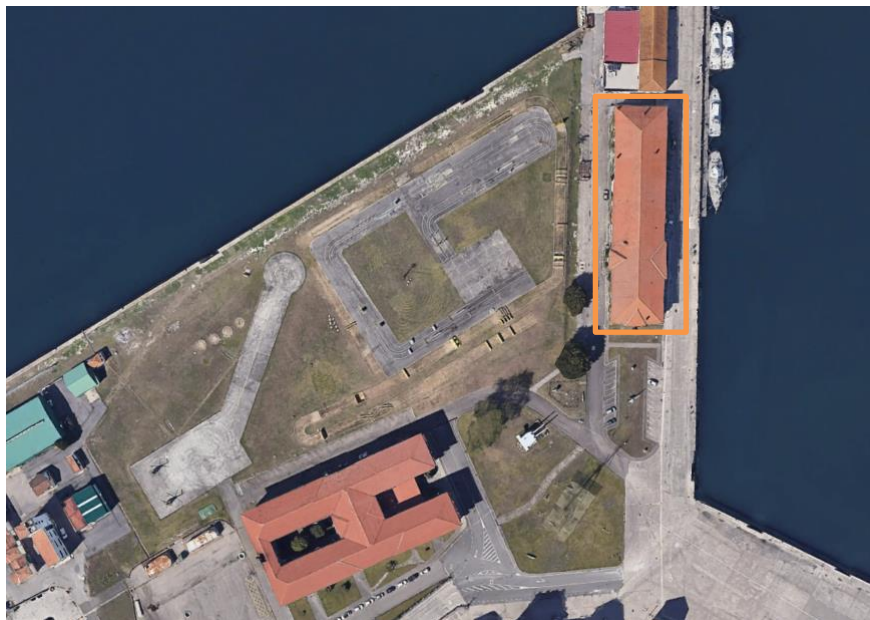


Figura 3-1 Vista aérea del Isaac Peral y alrededores. (Fuente: [30])

El edificio (Figura 3-2) fue construido en la década de 1960 y responde a una tipología arquitectónica racionalista propia de la época, con una planta rectangular de aproximadamente 60×20 m y dos plantas sobre rasante. La altura total del edificio es de aproximadamente 12 m. La superficie construida total es de aproximadamente 2.100 m^2 , de los que se estima una superficie útil climatizada de en torno a 1.800 m^2 distribuida entre las distintas plantas.

Los cerramientos exteriores están ejecutados con muros de obra de fábrica de ladrillo macizo de 45 cm de espesor, sin aislamiento térmico adicional, lo que les confiere una transmitancia térmica U elevada

pero también una inercia térmica considerable que amortigua las variaciones de temperatura exterior. Las fachadas presentan una proporción significativa de superficie acristalada, con ventanas de marco metálico de una hoja practicable y vidrio simple, que constituyen el elemento de mayor pérdida térmica de la envolvente. Las cubiertas son planas con acabado de gravilla, sin aislamiento térmico relevante. Los valores de transmitancia térmica de los principales elementos de la envolvente, obtenidos por Sánchez-Ferragut Guitart [12] mediante simulación dinámica y calibración frente a consumos reales que se recogen en la Tabla 3-1.



Figura 3-2 Edificio Isaac Peral

La orientación del edificio es predominantemente norte-sur, con las fachadas principales orientadas al este y al oeste. La fachada este recibe radiación solar directa durante las horas de la mañana y la fachada oeste durante las horas de la tarde, lo que implica ganancias solares asimétricas a lo largo del día y una variación significativa de la carga térmica entre las aulas orientadas a cada fachada. La fachada norte, de menor superficie acristalada, es la que mayores pérdidas por transmisión presenta en invierno al no recibir radiación solar directa.

El régimen de ocupación es de tipo académico-laboral, con horario de actividad concentrado en la franja de 8:00 a 19:00 horas de lunes a viernes durante los periodos lectivos, y actividad reducida o nula en fines de semana y periodos vacacionales. Esta característica de uso tiene especial relevancia para el dimensionamiento de la bomba de calor, pues la demanda de calefacción se concentra en horas diurnas y existen largos periodos de parada durante los que el terreno puede recuperarse térmicamente, como se desarrollará posteriormente.

3.1.2 Sistema de calefacción actual y consumos reales

El edificio Isaac Peral dispone actualmente de un sistema de calefacción centralizado mediante caldera de gas natural, con una antigüedad superior a 15 años. La distribución del calor se realiza a través de una red de tuberías de agua caliente que alimenta radiadores convencionales instalados en las distintas estancias del edificio. El sistema no dispone de capacidad de refrigeración, por lo que el edificio carece de climatización durante los meses de verano. La caldera opera únicamente durante el periodo lectivo de otoño-invierno-primavera, permaneciendo apagada durante los meses de junio a septiembre coincidiendo con el periodo de embarco y vacaciones del alumnado.

La oficina de mantenimiento de la ENM ha facilitado los datos de consumo real de gas natural del edificio. La Tabla 3-1 recoge el desglose mensual correspondiente al año 2018, que constituye el año de referencia más completo disponible previo a las alteraciones de consumo introducidas por la pandemia de 2020 [5]:

Mes	Consumo real (MWh)	Consumo real (kWh)	Observaciones
Enero	14,06	14.060	Invierno. Inicio de curso.
Febrero	29,51	29.510	Mes pico. Máxima demanda anual.
Marzo	20,44	20.440	Alta demanda. Plena ocupación.
Abril	7,26	7.260	Demanda media. Primavera.
Mayo	7,26	7.260	Demanda media. Fin de curso.
Junio	0,00	0	Caldera apagada. Sin ocupación.
Julio	0,00	0	Caldera apagada. Sin ocupación.
Agosto	0,00	0	Caldera apagada. Sin ocupación.
Septiembre	0,00	0	Caldera apagada. Sin ocupación.
Octubre	1,11	1.110	Inicio temporada. Baja demanda.
Noviembre	13,15	13.150	Alta demanda. Plena ocupación.
Diciembre	24,60	24.600	Alta demanda. Segundo pico anual.
TOTAL	117,39	117.390	—

Tabla 3-1 Consumo mensual de gas natural del edificio Isaac Peral (año 2018). (Basado en: Oficina de mantenimiento ENM [5])

El perfil de consumo es marcadamente estacional. La demanda de calefacción se concentra en los cinco meses fríos de noviembre a marzo, que acumulan el 94,1% del consumo anual. El mes de mayor demanda es febrero con 29,51 MWh, seguido de diciembre con 24,6 MWh. Durante los meses de junio a septiembre el consumo es nulo, coincidiendo con el periodo de embarco del alumnado y el cierre del edificio.

Los datos más recientes muestran una tendencia de consumo claramente creciente. En 2025 el consumo total de gas ascendió a 16.167 m³, equivalentes a 153.500 kWh, obtenidos aplicando el poder calorífico superior del gas natural canalizado en Galicia, de 9,5 kWh/m³ [31], un 30,7% superior al de 2018. Esta tendencia se acentúa en los primeros meses de 2026: en enero se consumieron 28.472 kWh y en febrero 34.598 kWh, valores que superan ampliamente tanto el consumo mensual de referencia de 2018 como el consumo anual completo de ese año, lo que indica un deterioro progresivo de la eficiencia del sistema actual [5].

Sin embargo, los datos de consumo real de gas no pueden utilizarse directamente como base para el dimensionamiento de la instalación geotérmica propuesta, por dos razones fundamentales. En primer lugar, los consumos reales reflejan el rendimiento de la caldera actual y no la demanda térmica real del edificio, que es lo que determina el tamaño de la bomba de calor. En segundo lugar, la instalación propuesta no solo dará servicio a la calefacción existente, sino que incorporará también la capacidad de refrigeración, de la que el edificio carece actualmente. Por estas razones, el dimensionamiento se realiza a partir de métodos de cálculo contrastados, el método de los grados-día para la calefacción y un método simplificado de transmisión para la refrigeración, aplicados sobre las características constructivas reales del edificio, tal como se desarrolla en los apartados siguientes. Los consumos reales de 2018 y 2025 se emplean como referencia de validación de los resultados obtenidos y como base del análisis económico comparativo.

3.2 Estimación de la demanda térmica

A continuación, se desarrollan los cálculos de la demanda térmica para el edificio Isaac Peral al partir de los cuales se va a dimensionar la instalación geotérmica horizontal. El cómputo comprende desde la caracterización de su envolvente hasta la obtención de la demanda anual de calefacción y de refrigeración. Para ello, se ha utilizado el método de los grados-día aplicado sobre las pérdidas térmicas de la envolvente.

3.2.1 Fundamento físico del método de grados-día

Antes de desarrollar los cálculos numéricos, es necesario comprender el fundamento físico presente en este método con el fin de aplicarlo correctamente y evaluar así la validez de la estimación de la demanda para el edificio Isaac Peral.

La demanda de calefacción de un edificio consiste en la cantidad de energía térmica que se debe suministrar para compensar las pérdidas de calor que se producen a través de la envolvente de este cuando la temperatura exterior es inferior a la temperatura interior de confort. Esta pérdida de calor obedece la ley de Fourier (ecuación 3) de la conducción de calor, que dice que el flujo de calor a través de un cerramiento es proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos lados del cerramiento (gradiente térmico) y a la conductancia térmica que es inversa de su resistencia térmica.

$$Q [W] = U \cdot A \cdot (T_{interior} - T_{exterior}) \quad (3)$$

Donde U es la transmitancia térmica del cerramiento medido en $W/K \cdot m^2$ (cuanto mejor esté aislado el edificio, menor será dicho valor), A es la superficie del cerramiento y $T_{interior} - T_{exterior} [K]$ es la diferencia de temperatura. Sumando esta expresión para todos los cerramientos de la envolvente del edificio y agrupando los productos $U \cdot A$ en un único coeficiente al que se llamará UA $[W/K]$ (ecuación 4).

$$Q_{total} [W] = UA \cdot (T_{interior} - T_{exterior}) \quad (4)$$

Esta expresión es la clave del método, pues la potencia de calefacción necesaria en cualquier instante es simplemente proporcional a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Esta linealidad es lo que hace posible este criterio que consiste en integrar esta diferencia de temperatura en el tiempo para obtener así la energía total a lo largo de un periodo.

El grado-día de calefacción de un día concreto, se define como la diferencia entre la temperatura interior de confort deseada y la temperatura media exterior de ese día (ecuación 5), siempre que sea positiva, pues si la temperatura exterior es mayor, no hay demanda de calefacción sino de refrigeración.

$$GD_{día} = \max(T_{base} - T_{ext.media}, 0) \quad (5)$$

Donde $GD_{día}$ es el grado-día de calefacción del día considerado ($K \cdot día$), T_{base} es la temperatura interior de confort adoptada como referencia, $21\text{ }^{\circ}C$ según el RITE ($^{\circ}C$), y $T_{ext.media}$ es la temperatura media exterior del día ($^{\circ}C$). Si la diferencia es negativa, el grado-día se toma como cero, pues no existe demanda de calefacción.

Acumulando los grados-día de todos los días del periodo de calefacción se obtienen los grados-día mensuales o anuales. La energía total de calefacción en un mes se obtiene mediante la ecuación 6:

$$E_{mes} = UA \cdot GD_{mes} \cdot h_{uso} \quad (6)$$

Donde E_{mes} es la demanda de calefacción del mes (Wh), UA es el coeficiente global de pérdidas térmicas del edificio (W/K), GD_{mes} es la suma de los grados-día de calefacción del mes ($K \cdot día$) y h_{uso} es el número de horas diarias de funcionamiento del sistema de calefacción ($h/día$).

El término huso es el número de horas diarias que el sistema de calefacción está en funcionamiento. Para una vivienda con calefacción continua, su uso sería de 24 horas. En el caso del edificio Isaac Peral,

la jornada lectiva es de 10 horas diarias, que es el valor de dicho término. Este factor es importante para no sobredimensionar la instalación.

La principal limitación de este método es que se asume que la carga térmica del edificio es estrictamente proporcional a la temperatura exterior, ignorando los aportes de calor que se producen por la radiación solar, las personas que ocupan una habitación o el calor emitido por los equipos electrónicos que en el caso del Isaac Peral no influyen estos últimos en una forma importante. Todos estos aportes de calor reducen la demanda real de calefacción respecto al valor calculado puramente. Para corregir, por tanto, dicha sobreestimación, se aplicará el factor de utilización (F_u) que se describe en el apartado 3.2.5.

3.2.2 Cálculo del coeficiente global de pérdidas térmicas UA

El coeficiente global de pérdidas térmicas UA , es el parámetro central del método pues cuantifica en W/K el calor que pierde el edificio por cada grado de diferencia de temperaturas. Por tanto, si el valor es elevado, esto indica que el edificio está mal aislado, mientras que, si es bajo, es un edificio eficiente. El UA se calcula como la suma de los productos $U \cdot A$ de todos los elementos que componen la envolvente térmica del edificio, incluyendo fachadas, cubiertas, suelos, ventanas, puertas y los puentes térmicos.

Los valores de la transmitancia térmica U de cada elemento del Isaac Peral han sido tomados de los estudios previos realizados para este mismo edificio, en concreto, del TFG de Sánchez-Ferragut en el año 2019 que los obtuvo del pliego de condiciones técnicas original del edificio y los verificó mediante simulación y calibración frente a los consumos reales de gas. Son, por tanto, valores respaldados por medición indirecta real y no simples estimaciones bibliográficas [12].

El valor de la transmitancia del suelo en contacto con el terreno es de $2,393 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ y se multiplica por un factor de reducción de 0,5 que tiene en cuenta que el terreno natural está a una temperatura intermedia entre la del interior y la del exterior. En invierno, mientras la temperatura del aire puede rondar los $0 \text{ }^\circ\text{C}$, la temperatura del suelo a 1,5 m de profundidad se encuentra entre $8\text{-}10 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto reduce a la mitad las pérdidas por el suelo respecto a las que habría si ese suelo estuviese en contacto con el aire exterior.

Las pérdidas por infiltración de aire consisten en la entrada no controlado de aire frío del exterior a través de las juntas de carpintería, los marcos de las ventanas y puertas, encuentros de fachada y cualquier discontinuidad que presente la envolvente. En el Isaac Peral, la antigüedad de la carpintería, pues se trata de cristal monolítico sin sellado moderno y marcos metálicos sin rotura de puente térmico, hace que estas infiltraciones sean muy significativas. La calibración del modelo realizada en el estudio de Sánchez-Ferragut, concluyó que las infiltraciones son el parámetro de mayor sensibilidad del modelo, confirmando la importancia de este término. Se adopta, por tanto, un recargo del 15% sobre las pérdidas por transmisión para contabilizar las infiltraciones, se trata de un valor bajo-medio para edificios de esa época y es coherente con la conclusión de la calibración (Tabla 3-2).

Elemento de la envolvente	U (W/m ² K)	S (m ²)	b	U·b·S (W/K)
Fachada exterior (ladrillo y hormigón, 45 cm, sin aislante)	1,363	700	1,0	954
Cubierta (tejado inclinado con lámina aislante)	1,558	1.050	1,0	1.636
Suelo planta baja (contacto con terreno)	2,393	500	0,5	598
Ventanas (cristal monolítico simple, sin RPT)	5,700	280	1,0	1.596
Puertas exteriores (madera + vidrio)	3,500	30	1,0	105
Infiltraciones (15 % adicional sobre transmisión)	—	—	—	645
TOTAL	—	—	—	5.534

Tabla 3-2 Coeficiente global de pérdidas térmicas UA del edificio Isaac Peral

Se establece como resultado un UA global para el Isaac Peral de 5.500 W/K, lo que implica que por cada grado Kelvin de diferencia entre en interior y el exterior, el edificio pierde 5,5 kW de calor.

3.2.3 Datos climáticos de Marín: temperatura media mensual y grados-día

Los datos de temperatura media exterior mensual se obtienen de la base de datos climatológica de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para Marín, en la provincia de Pontevedra, en la serie representativa 1981-2010 [15]. Marín presenta un clima oceánico atlántico, caracterizado por inviernos suaves y lluviosos, veranos frescos y humedad relativa elevada durante todo el año. La temperatura media anual es de 14 °C y las temperaturas raramente superan en verano los 30 °C o bajan en invierno de 5 °C. Esto hace que la demanda de calefacción sea moderada en comparación a zonas con clima continental como es el caso de Madrid o de Burgos, pero sostenida durante una larga temporada fría (de octubre a mayo) haciendo la demanda de refrigeración más reducida.

El cálculo de los grados-día de calefacción (Tabla 3-3) se realiza con una temperatura de confort interior de 21 °C que es la temperatura consigna interior para edificios docentes establecida en la Instrucción Técnica IT 1.1.4.1.2 del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Para cada mes del periodo lectivo, el grado-día mensual es el producto de la diferencia de temperaturas por el número de días lectivos de cada mes. Solo se tienen en cuenta los meses en los que la temperatura media mensual es inferior a la temperatura interior.

Un aspecto diferenciador de este cálculo es el número de días lectivos por mes durante el periodo escolar. Esta cifra es de aproximadamente 22 días por mes a excepción de mayo en los que únicamente hay 10 días con una temperatura inferior a la interior. Los fines de semana y festivos no generan demanda pues el edificio no se utiliza. Ignorar, por tanto, este hecho y calcular con los días totales de cada mes implicaría sobreestimar la demanda y de esta forma la instalación.

Mes	T _{ext media} (°C)	T _{base} (°C)	ΔT (K)	Días lectivos	GD lectivos (K·día)
Enero	8,8	21	12,2	31	378
Febrero	9,2	21	11,8	28	330
Marzo	11	21	10	22	220
Abril	12,5	21	8,5	18	153
Mayo	14,3	21	6,7	10	67
Jun-Ago	—	—	—	0	0 (Uso mínimo)
Sept.	17,1	21	3,9	8	31
Octubre	14,1	21	6,9	22	152
Nov.	10,8	21	10,2	22	224
Diciembre	9	21	12	22	264
TOTAL	—	—	—	183	1.820

Tabla 3-3 Grados-día lectivos mensuales de Marín. (Elaboración propia a partir de datos AEMET [12])

El total de 1.820 grados-día lectivos anuales es el parámetro que determina la demanda anual de calefacción del Isaac Peral en combinación con su UA.

3.2.4 Demanda bruta de calefacción por el método de grados-día

Con el coeficiente de pérdidas UA de 5.500 W/K y los grados-día lectivos mensuales calculados en el apartado anterior, la demanda bruta de calefacción de cada mes se obtiene aplicando la ecuación 7.

$$E_{\text{bruta/mes}} = UA \cdot GD_{\text{mes}} \cdot 10 \quad (7)$$

Donde $E_{\text{bruta/mes}}$ es la demanda bruta de calefacción del mes sin corregir por ganancias libres (Wh), UA es el coeficiente global de pérdidas térmicas del edificio, igual a 5.500 W/K, GD_{mes} es la suma de grados-día lectivos del mes (K·día) y 10 h/día es el número de horas diarias de uso del edificio durante el periodo lectivo.

El factor de 10 horas al día es el régimen real de funcionamiento del sistema durante la jornada lectiva. Se aplica de forma uniforme a todos los meses ya que la ocupación diaria del edificio es consistente a lo largo del periodo lectivo. La Tabla 3-4 muestra el cálculo por meses, obteniendo finalmente la demanda bruta de calefacción para cada mes del periodo lectivo.

Mes	GD lectivos (K·día)	Horas uso/día	UA (W/K)	Demanda bruta (kWh/mes)
Enero	378	10	5.500	20.801
Febrero	330	10	5.500	18.172
Marzo	220	10	5.500	12.100
Abril	153	10	5.500	8.415
Mayo	67	10	5.500	3.685
Jun-Ago	—	—	—	0
Sept.	31,2	10	5.500	1.716
Octubre	152	10	5.500	8.349
Nov.	224	10	5.500	12.342
Diciembre	264	10	5.500	14.520
TOTAL	1.820	—	—	100.100

Tabla 3-4 Demanda bruta mensual de calefacción.

La demanda bruta anual calculada es de aproximadamente 100.100.000 Wh/año lo que equivale a 100.100 kWh/año que son 100 MWh/año. Este valor representa la energía que debería suministrar el sistema de calefacción si la bomba de calor pudiera modular perfectamente su potencia en todo momento según la demanda instantánea del edificio y si no existiesen ganancias de calor libres, anteriormente mencionadas. En la práctica, ambas condiciones no se cumplen y, por tanto, la demanda real es menor.

3.2.5 Factor de utilización (F_u) y demanda real corregida

El método de los grados-día aplicado en los apartados anteriores calcula la demanda bruta de calefacción a partir de las pérdidas por transmisión a través de la envolvente, sin considerar explícitamente las ganancias libres del edificio: la radiación solar que penetra a través de las ventanas, el calor generado por la ocupación y los equipos, y el calor aportado por la iluminación artificial. En un edificio docente con una proporción significativa de superficie acristalada y una ocupación densa durante el horario lectivo, estas ganancias libres son relevantes y reducen la demanda real de calefacción respecto al valor bruto calculado. El factor de utilización F_u es el parámetro que recoge esta corrección de forma simplificada, siguiendo la metodología descrita en la Guía Técnica IDAE para el diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado [1]. Este método es el procedimiento de referencia en España para el diseño de instalaciones geotérmicas en fase de anteproyecto y ha sido validado frente a simulaciones dinámicas en edificios de características similares. No obstante, no considera la variación horaria de la radiación solar ni la inercia térmica de forma dinámica, y asume una distribución uniforme de la demanda dentro de cada mes; para una estimación más precisa sería necesario recurrir a simulación dinámica horaria.

Físicamente, el F_u representa la fracción del tiempo en que la bomba de calor está realmente en funcionamiento durante un mes dado, incorporando tanto el efecto de las ganancias libres como la operación intermitente del sistema cuando la demanda es inferior a la potencia nominal de la bomba de calor. En los meses más fríos de invierno (enero, febrero y diciembre), con temperaturas exteriores medias de 8-9 °C y escasa radiación solar, las ganancias libres son mínimas y el sistema debe funcionar casi continuamente para mantener la temperatura de confort de 21 °C, por lo que F_u se aproxima a 0,9. En los meses de entretiempo (septiembre y mayo), con temperaturas medias de 14-17 °C, las ganancias son importantes por el mayor número de horas solares y la mayor intensidad de la radiación; además, la inercia térmica de los muros de 45 cm de ladrillo amortigua las variaciones de temperatura y hay muchas horas del día en las que el edificio no necesita calefacción aunque la temperatura media diaria sea inferior a 21 °C, por lo que F_u se establece entre 0,45 y 0,55.

La Tabla 3-5 presenta el cálculo de la demanda real mensual de calefacción aplicando los valores de F_u adoptados según el método de la Guía Técnica IDAE [1]:

Mes	Demanda bruta (kWh)	F_u	Razón del factor F_u	Demanda real (kWh)
Enero	20.801	0,90	Invierno severo, pocas ganancias libres	18.721
Febrero	18.172	0,88	Invierno severo, días algo más largos	15.991
Marzo	12.100	0,78	Primavera incipiente, más radiación solar	9.438
Abril	8.415	0,70	Primavera avanzada, ganancias moderadas	5.891
Mayo	3.685	0,55	Entretiempo, aportes solares importantes	2.027
Jun–Ago	0	—	Edificio cerrado a excepción de días de exámenes	0
Septiembre	1.716	0,45	Inicio de curso, calor residual del suelo	772
Octubre	8.349	0,70	Otoño con radiación moderada	5.844
Noviembre	12.342	0,82	Inicio invierno, menos radiación solar	10.120
Diciembre	14.520	0,88	Invierno pleno, mínima radiación solar	12.778
TOTAL	100.100	—	—	81.582

Tabla 3-5 Demanda real mensual de calefacción con factor de utilización F_u . (Fuente: elaboración propia a partir de [1])

La demanda real de calefacción estimada para el edificio Isaac Peral es de aproximadamente 81.500 kWh/año, resultado de aplicar el factor de utilización sobre la demanda bruta de 100.100 kWh/año, lo

que supone una corrección del 18,6%. Este valor se emplea como dato de partida para el dimensionamiento de la bomba de calor y para el análisis económico comparativo.

3.2.6 Estimación de la demanda de refrigeración

El edificio Isaac Peral está situado en un clima atlántico con veranos frescos. Además, permanece cerrado durante los meses de junio, julio y agosto debido a las prácticas de los alumnos en la Flota y su permiso de verano, exceptuando los días de julio de exámenes extraordinarios y de curso de refuerzo intensivo, meses que corresponden a los más calurosos del año. Por ambas razones, la demanda de refrigeración es mucho menor a la demanda de calefacción y se concentra exclusivamente en los últimos días de mayo y las primeras semanas de septiembre, cuando pueden registrarse días calurosos dentro del período lectivo.

El método de cálculo de la demanda de refrigeración sigue la misma lógica que el de calefacción, pero a la inversa, en lugar de calcular las pérdidas de calor cuando el exterior está frío, se calcula la ganancia de calor cuando el exterior está a una temperatura mayor. La carga de refrigeración por transmisión a través de la envolvente cuando la temperatura exterior supera la temperatura de consigna interior de refrigeración es de 25 °C (ecuación 8).

$$Q_{\text{refrigeración}} = UA \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) = 5.500 \cdot (T_{\text{ext}} - 25) \quad (8)$$

Donde $Q_{\text{refrigeración}}$ es la carga térmica de refrigeración por transmisión a través de la envolvente (W), UA es el coeficiente global de pérdidas térmicas del edificio (W/K), T_{ext} es la temperatura media exterior del periodo considerado (°C) y T_{int} es la temperatura interior de consigna de refrigeración, adoptada como 25 °C según el RITE (°C).

Para la condición de diseño de verano en Pontevedra, donde la temperatura exterior máxima es de 30 °C, la carga por transmisión es de $5.500 \cdot 5 = 27.500$ W. Esta es solo la componente de transmisión, la carga total de refrigeración incluye, además, las ganancias solares a través de las ventanas debido a la radiación solar, y las ganancias internas, formadas por personas y equipos. Sin embargo, la masa térmica muy elevada de los muros de 45 cm de ladrillo y hormigón actúa como un regulador térmico eficaz pues el calor tarda mucho tiempo en penetrar a través del muro, con lo que, en los días de calor moderado, la temperatura interior puede mantenerse por debajo de los 25 °C durante la mayor parte de la jornada lectiva sin necesidad de una refrigeración activa.

Para cuantificar la demanda de refrigeración se aplica un factor de reducción de 0,35, que implica que solo el 35 % del calor que entra al edificio en los días calurosos requiere actuación activa del sistema de refrigeración, siendo el resto gestionado de forma pasiva por la inercia térmica de la envolvente. Este factor es conservador, favoreciendo la seguridad en el dimensionamiento.

Adoptando 10 días de calor en mayo y 8 días en septiembre donde la temperatura es superior a 25 °C:

$$E_{\text{refrig,mayo}} = 5.500 \cdot 5 \cdot 10 \frac{h}{\text{día}} \cdot 10 \text{ días} \cdot 0,35 = 962.500 \text{ Wh} = 963 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{refrig,sept}} = 5.500 \cdot 5 \cdot 10 \frac{h}{\text{día}} \cdot 8 \text{ días} \cdot 0,35 = 770.000 \text{ Wh} = 770 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{refrig,total}} = 963 + 770 = 1.733 \text{ kWh/año}$$

Para incorporar un margen de seguridad que cubra aportes solares no modelados como pueden ser las ventanas de gran formato del Isaac Peral que puedan generar ganancias solares significativas, posibles años con periodos calurosos más prolongados y la incertidumbre inherente a este tipo de estimación simplificada, se adopta como demanda de refrigeración aproximadamente el doble al

calculado, por tanto, la demanda de refrigeración anual estimada para el dimensionamiento es de 3.200 kWh/año.

3.3 Cálculo de la potencia punta y selección de la bomba de calor

3.3.1 Cálculo de la potencia punta

El cálculo de la potencia punta de la bomba de calor es independiente del cálculo de la demanda energética anual pues no atiende a cuanta energía necesita el edificio a lo largo del año sino a cuál es la potencia máxima que el sistema debe ser capaz de suministrar en el momento de mayor demanda instantánea. Este valor es el que determina el tamaño de la máquina y de la instalación hidráulica interior.

La potencia punta de calefacción se calcula en las condiciones climáticas más desfavorables del año, establecidas por las normas de diseño térmico de edificios. Según la norma europea UNE-EN 12831:2017 y el RITE, la temperatura exterior de cálculo para la zona climática de Pontevedra es de 0 °C, valor que corresponde al percentil 1 % de las horas del periodo de calefacción pues es la temperatura que solo se alcanza o supera en el 1 % de las horas de invierno, lo que equivale a unas 43 horas al año. Este criterio asegura que el sistema sea capaz de mantener el confort en casi la totalidad de las horas de invierno sin necesitar de un apoyo [16] [17].

Con la temperatura exterior de diseño de 0 °C y la temperatura interior consigna de 21 °C, la diferencia térmica de diseño es de 21 K. La potencia punta se calcula en la ecuación 9.

$$Q_{\text{punta, calef}} = UA \cdot \Delta T_{\text{diseño}} = 5.500 \frac{W}{K} \cdot 21 K = 115.500 W \sim 115 kW \quad (9)$$

3.3.2 Criterios de subdimensionamiento de la bomba de calor

Este valor representa la carga máxima teórica del edificio. Sin embargo, la práctica de diseño de instalaciones geotérmicas establece que la bomba de calor no debe dimensionarse para cubrir exactamente esta carga punta, por las razones que se exponen a continuación.

En primer lugar, la condición de diseño de 0 °C se registra en Marín en unas 43 horas al año [15], prácticamente siempre durante las horas nocturnas entre las 3h y las 7h, cuando el edificio permanece cerrado y sin actividad docente. Durante el horario lectivo habitual, de 8h a 19h, la temperatura exterior en los meses de invierno rara vez desciende por debajo de 5-6 °C, lo que reduce la carga real del edificio a aproximadamente el 60-65% de la potencia punta teórica.

En segundo lugar, la elevada masa térmica del edificio Isaac Peral, cuyos muros tienen un espesor de 45 cm de ladrillo y hormigón, amortigua significativamente los picos de demanda térmica. La inercia térmica de la envolvente implica que el edificio tarda varias horas en enfriarse ante un descenso brusco de la temperatura exterior, de modo que la potencia necesaria para recuperar la temperatura de confort desde la temperatura de guardia es muy inferior a la punta teórica calculada en régimen estacionario.

En tercer lugar, el edificio tiene un uso estrictamente discontinuo: permanece cerrado durante los fines de semana, los festivos y los periodos vacacionales, que representan aproximadamente el 45% de los días del año. Este perfil de uso es radicalmente diferente al de un edificio residencial u hospitalario, donde la demanda es continua y la bomba de calor debe cubrir la carga punta en cualquier momento del día.

En cuarto lugar, las bombas de calor modernas con compresor de velocidad variable trabajan con mayor rendimiento (COP) a carga parcial que a plena carga. Dimensionar para el 80-85% de la punta permite que la máquina opere en su punto óptimo durante la mayor parte del año.

Por estas razones, la Guía Técnica IDAE [1] establece que en edificios con uso discontinuo no es técnica ni económicamente justificable dimensionar la bomba de calor para el 100% de la potencia punta. El criterio adoptado es complementar la bomba de calor con resistencias eléctricas de apoyo para los arranques en los días más fríos: estas resistencias tienen un coste eléctrico superior al de la bomba de

calor, pero solo se activan un número muy reducido de horas al año, por lo que su impacto en el consumo total anual es marginal.

Dado que la temperatura exterior durante las horas lectivas de invierno se sitúa habitualmente entre 5 y 8 °C, la carga real del edificio en esas condiciones es de aproximadamente 38-42 kW. Se selecciona por tanto una bomba de calor geotérmica de 40 kW de potencia nominal con COP de 3,9, compuesta por dos unidades de 20 kW en paralelo para garantizar la redundancia y permitir la operación parcial en los periodos de menor demanda. Las resistencias eléctricas de apoyo de 5 kW cubren los picos extremos con un impacto marginal sobre el consumo anual total.

3.3.3 Selección del modelo de la bomba de calor

El sistema de captación horizontal proyectado utiliza un circuito cerrado con fluido caloportador de agua y monopropilenglicol al 25%, por lo que la configuración de bomba de calor necesaria es agua-agua. En esta configuración, el equipo intercambia calor entre dos circuitos hidráulicos completamente independientes: el circuito de captación, por el que circula el fluido agua-glicol procedente de las zanjas, y el circuito interior, por el que circula agua caliente hacia los fancoils. Esta separación física entre ambos circuitos, realizada a través del intercambiador interno de la bomba de calor, garantiza que el fluido anticongelante del captador nunca entra en contacto con el agua del circuito de distribución interior, lo que simplifica el mantenimiento y elimina el riesgo de contaminación. La alternativa de expansión directa, en la que el refrigerante circula directamente por las tuberías del captador sin fluido intermedio, queda descartada por la dificultad de garantizar la estanqueidad del refrigerante en un circuito enterrado de 2.000 m de longitud y por la mayor complejidad de mantenimiento que implica en un edificio de uso institucional [1].

Definida la configuración, los criterios de selección del modelo concreto son los siguientes: potencia nominal unitaria de 20 kW para que dos unidades en paralelo alcancen los 40 kW totales necesarios; reversibilidad para dar servicio tanto a calefacción como a refrigeración; COP certificado según EN 14511 en condiciones W10/W35, representativas de la operación media anual en Marín; resistencias eléctricas de apoyo integradas en la propia unidad; y sistema de control que permita la operación en paralelo con lógica de cascada sin centralita externa. Se valora además la experiencia contrastada del fabricante en instalaciones geotérmicas, la disponibilidad de servicio técnico especializado en España y la longevidad demostrada de sus equipos.

El modelo que mejor satisface todos estos criterios es el Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai, fabricado por Waterkotte GmbH en Herne, Alemania. Waterkotte es una empresa con más de 40 años de dedicación exclusiva a bombas de calor geotérmicas, con la mayor potencia geotérmica instalada en Alemania durante varios años consecutivos y equipos de primera generación que siguen en funcionamiento casi cuatro décadas después de su instalación. El modelo seleccionado incorpora un compresor Scroll de velocidad variable con tecnología Inverter que adapta la potencia a la demanda real del edificio en cada momento, trabajando con mayor rendimiento a carga parcial que a plena carga, condición especialmente favorable en un edificio docente con uso discontinuo y demanda variable a lo largo del día y de la semana. Las resistencias eléctricas de apoyo de 5 kW están integradas en la unidad, y el sistema de control WWPR 2 permite conectar hasta ocho unidades en paralelo con lógica de cascada sin centralita adicional, lo que simplifica la instalación y el mantenimiento [32].

El COP certificado en condiciones W10/W35 según EN 14511 es de 4,8. Esta notación indica temperatura del fluido del captador a 10 °C y temperatura de impulsión al circuito interior a 35 °C, que coinciden con las condiciones medias de operación de la instalación: la temperatura media anual del subsuelo a 1,2 m de profundidad en Marín es de aproximadamente 10 °C, y los fancoils trabajan eficientemente con una impulsión de 35 °C. El COP no es un valor fijo, sino que varía con las condiciones de operación: en los días más fríos, cuando el fluido del captador se aproxima a los 0 °C, el COP desciende al valor W0/W35 de aproximadamente 3,9; en los meses de entretiempo, con el terreno más cálido, lo supera. Para el cálculo del consumo eléctrico anual se adopta el valor W10/W35 de 4,8 por ser

el más representativo del funcionamiento estacional medio de la instalación [32]. Las características técnicas completas del modelo seleccionado se recogen en el Anexo III.

3.3.4 Resumen de los parámetros de selección

Parámetro	Valor
Coefficiente global pérdidas UA del edificio	5.500 W/K
Temperatura exterior de diseño (calefacción)	0 °C (percentil 1 %, zona Pontevedra)
Temperatura interior de consigna (calefacción)	21 °C (RITE, edificios docentes)
Diferencia de temperatura de diseño	21 K
Potencia punta de calefacción calculada	$5.500 \times 21 = 115.500 \text{ W} \sim 115 \text{ kW}$
Criterio de selección BDC (no cubrir 100% de la punta)	Dimensionar para 80-90% de la punta + apoyo eléctrico
Potencia nominal BDC seleccionada	$2 \times 20 \text{ kW}$ en paralelo, control de cascada= 40 kW total
Potencia de apoyo eléctrico (resistencias integradas)	$2 \times 5 \text{ kW}$ (cubre el 10% de horas más frías del año)
Temperatura exterior diseño refrigeración	30 °C
Diferencia de temperatura diseño refrigeración	5 K (30 - 25)
Potencia punta refrigeración bruta	27.500 W $\sim$ 28 kW
Potencia refrigeración efectiva (factor reducción 0,35)	$\sim 9,6 \text{ kW} \Rightarrow$ cubierta sobradamente por los 40 kW

Tabla 3-6 Resumen de parámetros que debe cubrir la bomba de calor

3.3.5 Configuración de las bombas

La configuración adoptada consiste en dos unidades de la gama Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai trabajando en paralelo, con una potencia nominal de 20-23 kW cada una en condiciones estándar W10/W35 (temperatura del fluido del captador a 10 °C, temperatura de impulsión al circuito interior a 35 °C), lo que proporciona una potencia total instalada de 40-46 kW. Las características técnicas completas del equipo se recogen en el Anexo III.

La elección de dos unidades en lugar de una sola de 40 kW responde a tres criterios. El primero es la redundancia operativa: en caso de avería de una unidad, la instalación puede seguir funcionando al 50% de potencia, lo que en los meses de mayor temperatura exterior (octubre, noviembre, marzo) es suficiente para mantener el confort. El segundo es la eficiencia a carga parcial: en los meses de entretiempo con demanda reducida, una sola unidad puede cubrir la carga sin necesidad de ciclar la segunda, operando en su punto óptimo de rendimiento. El tercero es la escalabilidad: el control integrado de la gama EcoTouch permite conectar hasta ocho unidades en cascada con una única centralita de control, lo que facilita una eventual ampliación de la instalación si en el futuro se incorporan nuevos espacios al sistema de climatización.

3.4 Estudio del terreno

El conocimiento de las propiedades termofísicas del terreno es determinante para el dimensionamiento del captador geotérmico, ya que el subsuelo constituye la fuente de energía de la instalación. El intercambio de calor depende de la conductividad térmica del terreno que se calcula en función del tipo de terreno, densidad, humedad y textura. Cuanto más elevado sea dicho coeficiente de conductividad del terreno, más rápidamente se transportará la energía térmica hacia la sonda en modo calefacción y, por consiguiente, también será más rápida la regeneración de la temperatura del subsuelo.

Para la obtención de estos datos, se realiza lo que se conoce como Test de Respuesta Térmica, por sus siglas TRT, que permite conocer las propiedades del subsuelo. Este ensayo, no obstante, presenta un coste elevado y requiere medios específicos, por lo que su realización queda vinculada a la fase ejecutiva del proyecto. Para el presente TFG, la caracterización del subsuelo se ha realizado a partir de la documentación cartográfica disponible. Se debe tener en cuenta, por tanto, que los valores de eficiencia podrían verse variados de forma ligera pues el estudio no es tan exhaustivo como lo sería el TRT.

Para este proyecto, en consecuencia, se han consultado los datos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) que dispone de mapas a partir de los que se pueden determinar las características geológicas del subsuelo de toda España, y, más en concreto, la hoja del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) en su hoja 185 que corresponde a la provincia de Pontevedra [6].

En caso de salir adelante la instalación, se debe realizar dicho estudio del terreno. En los siguientes subapartados se pasará a explicar ambos métodos.

El terreno seleccionado para realizar la instalación es la pista militar, que presenta las condiciones óptimas tanto de espacio como de cercanía al Isaac Peral. Para realizar la excavación, se deberá quitar tanto la pista militar como la pista de pentatlón naval y, una vez finalizada la obra se pueden volver a montar pues el peso de ambas pistas y de los alumnos que las realizan no representa ningún riesgo para el buen funcionamiento de la instalación geotérmica horizontal.

3.4.1 Metodología de caracterización del subsuelo

Para la caracterización del subsuelo de la parcela del Isaac Peral, se consulta la cartografía del Instituto Geológico Nacional (IGME), concretamente mediante las hojas del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (MAGNA). Esta metodología es la recomendada en la fase de prediseño pues no se disponen de los medios para realizar el Test de Respuesta Térmica del terreno (TRT). Este criterio ha sido también aplicado en estudios previos de instalaciones geotérmicas en la Escuela Naval Militar.

En la hoja 04-10 (185) del MAGNA sobre la provincia de Pontevedra, se puede observar que toda la zona donde está ubicada la Escuela Naval Militar está formada por rocas ígneas, en concreto conformada por granitos de afinidad alcalina y granito de feldespató alcali.

La alternativa más precisa para caracterizar el subsuelo es el TRT que determina la conductividad térmica del terreno mediante la medición de la evolución de la temperatura del fluido al introducir una potencia térmica conocida en un sondeo piloto con una duración de dos a tres días. Según la norma VDI 4640, el TRT es obligatorio para instalaciones con potencia superior a 30 kW, para zonas con alta concentración de sistemas individuales, para instalaciones con un funcionamiento superior a 2.400 horas al año o para instalaciones con gran demanda de refrigeración [7]. La instalación proyectada supera el umbral de los 30 kW, por lo que sería necesario realizar el TRT en la fase ejecutiva del proyecto.

3.4.2 Litología del subsuelo, granito de la Ría de Pontevedra

El subsuelo de Marín y de toda la Ría de Pontevedra, está constituido en su mayoría de granito de edad hercínica (Carbonífero superior y Pérmico), correspondiente al batolito granítico que aflora ampliamente en el noroeste de la Península Ibérica. Se trata, por tanto, de granito calcoalcalino de grano medio-grueso, con predominancia de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y mica biotita, con un grado de alteración que varía a razón de la profundidad, presentando, en los primeros metros, roca alterada (sapolito) mientras que, a partir de 1,5 metros de profundidad, el granito aparece en estado sano o ligeramente alterado.

Una característica que es especialmente favorable para la geotermia horizontal es el alto grado de saturación hídrica del granito en la zona de Marín, pues la elevada pluviometría del clima reinante (> 1.500 mm/año) mantiene el suelo superficial permanentemente húmedo y la red de fracturación del granito favorece la infiltración y la retención de humedad a la profundidad donde se pretende la instalación de las tuberías del captador. Esta saturación hídrica tiene una gran importancia para el diseño geotérmico como se detalla en el siguiente apartado.

La Tabla 3-7 resume las propiedades termofísicas del granito húmedo, obtenidas de la norma VDI 4640 parte 1, tabla 1, que proporciona los valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica de los principales tipos de roca:

Propiedad	Rango (VDI 4640)	Valor típico adoptado	Unidad
Densidad	2.400 – 3.000	2.650	kg/m ³
Conductividad térmica (λ)	2,1 – 4,1	3,4	W/(m·K)
Capacidad térmica volumétrica ($\rho \cdot C_p$)	2,1 – 3,0	2,4	MJ/(m ³ ·K)
Difusividad térmica ($\alpha = \lambda / \rho C_p$)	—	$1,42 \times 10^{-6}$	m ² /s

Tabla 3-7 Propiedades termofísicas del granito húmedo. (Tomada de: [15])

El valor de la conductividad térmica $\lambda = 3,4$ W/(m·K) es el valor típico para suelos de granito de alta conductividad, lo que sitúa a Marín en la categoría más favorable para la instalación de captadores geotérmicos.

3.4.3 Temperatura del terreno no perturbado

La temperatura del terreno no perturbado es el parámetro térmico de referencia a la hora de diseñar el captador. A las profundidades de instalación de los captadores horizontales (de 0,6 a 1,5 metros), la temperatura del subsuelo está controlada por la temperatura media anual del aire exterior pero corregida por el efecto amortiguador de la masa del suelo.

Para Marín, la temperatura media anual del aire exterior se aproxima a los 14 °C, según la base de datos climatológica de AEMET [15]. A una profundidad de 1,2 metros, la temperatura del terreno oscila entre los 8 °C al final del invierno y los 16 °C al final del verano, con un valor medio anual que se puede aproximar a 12 °C.

En los estudios de simulación TRNSYS realizados previamente para el Isaac Peral (Rubiera Quesada, 2016), se asumió una temperatura media del terreno entre 10 y 12 °C como condición de contorno del captador geotérmico, siendo este un valor coherente con el adoptado en el presente estudio. A efectos de cálculo del COP de la bomba de calor, se adoptará una temperatura de 10 °C manteniendo así el perfil conservador del estudio [11].

3.4.4 Tipo de suelo y extracción térmica

La clasificación del tipo de suelo a efectos del dimensionamiento del captador horizontal se realiza según la Tabla 1 de la norma VDI 4640 parte 2, que proporciona los valores de extracción térmica específica en W/m^2 en función del tipo de subsuelo y del número de horas de funcionamiento anuales (Tabla 3-8).

Tipo de subsuelo	Extracción específica 1.800 h/año (W/m^2)	Extracción específica 2.400 h/año (W/m^2)
Suelos no cohesivos secos	10	8
Suelos cohesivos húmedos	20 – 30	16 – 24
Arena/Grava saturada de agua	40	32
Granito húmedo (Marín) — clasificado como suelo cohesivo húmedo de alta conductividad	25 – 30	—

Tabla 3-8 Extracción térmica específica para captación horizontal. (Tomada de: [7])

La norma VDI 4640 parte 2, en su versión recogida en la Guía Técnica IDAE-09.3.04, señala que los valores de la tabla anteriormente relacionada son aplicables bajo las siguientes condiciones limitantes: que la potencia de instalación no sea superior a 30 kW; sea únicamente para la extracción de calor (calefacción y ACS); que la profundidad de la instalación se encuentre entre 1,2 y 1,5 metros; que la separación de tubos sea entre 0,3 y 0,8 metros; y, por último, que presente una configuración de tubos paralelos [1], [7].

3.4.5 Justificación del valor de extracción específica adoptado

La tabla VDI 4640 para captación horizontal no incluye explícitamente la categoría “granito húmedo” como tipo de suelo independiente, pues está concebida para suelos superficiales (0-2 m), donde lo habitual es encontrar suelos o sedimentos y no roca desnuda. En la zona de Marín, el perfil típico del subsuelo en el primer metro y medio de profundidad consiste en una capa superficial de suelo vegetal o saprolito de 0,3-0,8 m de espesor, seguida de granito alterado. Este perfil corresponde a la categoría de “suelos cohesivos húmedos” de la VDI 4640, con una conductividad térmica superior a la media de esa categoría por la presencia de roca granítica.

El valor de la extracción específica de 25 W/m^2 para 1.800 h/año adoptado en este estudio se justifica por tres razones:

Una alta conductividad térmica del granito con respecto a suelos cohesivos húmedos convencionales, lo que incrementa la tasa de transferencia de calor hacia el captador.

La saturación hídrica permanente del subsuelo debido a la elevada pluviometría de Marín y la capacidad de infiltración del granito fracturado garantizan que el suelo superficial se mantenga húmedo durante todo el año, lo que favorece la recuperación térmica del terreno.

Al proponerse una instalación reversible, la inyección activa de calor al terreno durante el periodo de refrigeración, recarga térmicamente el subsuelo, reduciendo de esta forma la extracción neta anual y permitiendo adoptar un valor de extracción específica superior al que correspondería a una instalación que únicamente incluya calefacción.

Como verificación cruzada, el valor de 25 W/m^2 adoptado es coherente con la Guía Técnica IDAE-09.3.04 que cita valores de extracción de 20-35 W/m^2 para suelos cohesivos húmedos con buena conductividad [1].

3.4.6 Limitaciones del método y necesidad del TRT

La caracterización del subsuelo mediante el MAGNA y la asignación de las propiedades termofísicas mediante las tablas de la VDI 4640 es adecuada únicamente para la fase de diseño preliminar que se realiza con el presente trabajo, pero presenta limitaciones inherentes que deben ser consideradas antes de la realización del proyecto ejecutivo:

Las propiedades del granito varían localmente en función del grado de alteración, el contenido en minerales y el grado de saturación. Por otra parte, el MAGNA proporciona información regional pero no local.

La VDI 4640 especifica que su método de tablas simplificado es únicamente aplicable en instalaciones de hasta 30 kW. La instalación proyectada tiene una potencia nominal de 40 kW, lo que supera este límite convirtiendo el TRT en indispensable [7].

Para conocer el perfil de real del subsuelo con sus distintos espesores o la profundidad en la que encontramos granito, son datos que deben confirmarse mediante sondeos de reconocimiento.

Por todo lo anterior, en caso de llevar a cabo la propuesta instalación geotérmica, se deberá realizar un TRT sobre un sondeo piloto. El coste estimado de este ensayo es de 5.000€ y permite confirmar el valor de la conductividad térmica real y dimensionar el captador con precisión.

3.5 Dimensionamiento del captador geotérmico horizontal

3.5.1 Datos de partida para el dimensionamiento

El dimensionamiento del captador horizontal parte de los resultados de la demanda térmica y del cálculo de la bomba de calor realizados previamente. La Tabla 3-9 recoge los datos.

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia nominal BDC (calefacción)	Q_{BDC}	40 kW (2×20 kW en paralelo, control de cascada)
COP calefacción adoptado	COP	4,8
Demanda anual de calefacción	E_{calef}	81.500 kWh/año
Demanda anual de refrigeración	E_{refrig}	3.200 kWh/año
Horas equivalentes de plena carga (calefacción)	h_{eq}	$81.500/40 \approx 2.038$ h/año
Horas de funcionamiento adoptadas	h_{fun}	1.800 h/año
Tipo de subsuelo	—	Granito húmedo
Extracción específica VDI 4640	q_{esp}	25 W/m ²
Factor corrector instalación reversible	F_{rev}	0,85
Temperatura terreno no perturbado	$T_{terreno}$	12 °C (media anual)

Tabla 3-9 Datos de partida para el dimensionamiento del captador horizontal

3.5.2 Horas de funcionamiento anuales.

La elección correcta de las horas de funcionamiento anuales es determinante para dimensionar la instalación, pues cuanto mayor sea dicho número de horas, menor será la extracción específica admisible, debido a que el terreno dispone de un tiempo menor para recuperar su temperatura. Con una demanda de 81.500 kWh/año y una potencia nominal de 40 kW, el número de horas equivalentes de plena carga se obtiene mediante la ecuación 10.

$$h_{\text{equiv}} = \frac{E_{\text{calef}}}{Q_{\text{BDC}}} = \frac{81.500 \text{ kWh/año}}{40 \text{ kW}} = 2.038 \text{ h/año} \quad (10)$$

Sin embargo, las horas reales de funcionamiento son superiores a las equivalentes pues la bomba de calor modulante trabaja a carga parcial durante una fracción del tiempo. Un factor de modulación típico de 0,75-0,85 para equipos modulantes convierte las 2.038 horas equivalentes en 2.400-2.700 horas reales de funcionamiento.

El valor de 1.800 h/año adoptadas para la selección de la extracción específica es un valor conservador frente a las horas reales de funcionamiento, lo que equivale a adoptar un margen de seguridad adicional en el dimensionamiento. Este criterio está justificado por la operación reversible del sistema, pues al inyectar calor al terreno en el modo de refrigeración, este recupera temperatura más rápidamente que en una instalación de solo calefacción, compensando el efecto del mayor número de horas de extracción.

3.5.3 Balance de la bomba de calor

El calor que la bomba de calor debe extraer del terreno a través del captador se calcula como la diferencia entre la energía térmica que entrega al circuito de calefacción del edificio y la energía eléctrica que consume el compresor se deduce de la ecuación 11.

$$Q_{\text{terreno}} = Q_{\text{BDC}} \cdot \frac{COP - 1}{COP} = 40 \cdot \frac{4,8 - 1}{4,8} = 40 \cdot 0,792 = 31,7 \text{ kW} \quad (11)$$

El resultado muestra que, de los 40 kW que la bomba de calor entrega al edificio en modo calefacción, 31,7 kW proceden del terreno y 8,3 kW son el aporte eléctrico del compresor. La extracción de 31,7 kW representa el calor que el captador debe ser capaz de transferir del terreno al fluido caloportador en las condiciones de diseño.

3.5.4 Cálculo de la superficie de captación

El primer cálculo que realizar es la superficie bruta de captación, que se obtiene dividiendo la potencia a extraer del terreno por la extracción térmica específica de la VDI 4640 mediante la ecuación 12.

$$S_{\text{bruta}} = \frac{Q_{\text{terreno}}}{q_{\text{esp}}} = \frac{31.700 \text{ W}}{25 \text{ W/m}^2} = 1.268 \text{ m}^2 \quad (12)$$

A continuación, se realiza la corrección por operación reversible, puesto que se debe tener en cuenta el periodo en el que la instalación se utiliza para refrigerar el edificio cediendo así calor al terreno a partir del captador.

En una instalación que únicamente ofrece calefacción, la VDI exige dimensionar el captador para la extracción máxima sostenida asumiendo que el terreno únicamente recupera su temperatura por conducción natural del calor solar durante el verano. En el caso de la instalación reversible que es objeto de estudio en este trabajo, el terreno recibe calor durante los periodos de refrigeración.

La Guía Técnica IDAE-09.3.04 señala que, en instalaciones reversibles, los valores de extracción específica admisibles pueden incrementarse respecto a los de la Tabla 1 de la VDI 4640, pues la recarga térmica activa en verano mejora la recuperación del terreno y reduce la degradación de la temperatura

entre temporadas. Este efecto se cuantifica mediante un factor de corrección de $F_{rev} = 0,85$, que reduce la superficie necesaria en un 15% [1]. Dicha superficie necesaria se calcula mediante la ecuación 13.

$$S_{diseño} = S_{bruta} \cdot F_{rev} = 1.268 m^2 \cdot 0,85 = 1.078 m^2 \Rightarrow \text{adoptado } 1.000 m^2 \quad (13)$$

El valor final se redondea conservadoramente a $1.000 m^2$, lo que introduce un margen del 7,2% respecto al valor calculado, adecuado dado el nivel de incertidumbre en la caracterización del terreno.

3.5.5 Cálculo de la longitud de tubería

La longitud total de tubería del captador se calcula a partir de la superficie de captación de diseño y la separación entre ejes de tubos recomendada, como se puede observar en la ecuación 14. Para terreno granítico húmedo, la VDI 4640 recomienda una separación de tubos de 0,5 m, que garantiza un intercambio eficiente de calor sin interferencia térmica significativa entre tubos adyacentes ni riesgo de formación de hielo entre ellos.

$$L_{tubería} = \frac{S_{diseño}}{\text{separación}} = \frac{1.000 m^2}{0,5 m} = 2.000 m \quad (14)$$

Esta longitud total de 2.000 m se organiza en zanjas paralelas. La longitud de cada zanja se limita a 60 m para facilitar la circulación del fluido caloportador y minimizar las pérdidas de carga en el captador. El número de zanjas se calcula mediante la ecuación 15.

$$N_{zanjas} = \frac{L_{tubería}}{L_{zanja}} = \frac{2.000 m}{60 m} = 33,3 \text{ zanjas} \rightarrow 34 \text{ zanjas} \quad (15)$$

3.5.6 Configuración geométrica del captador

La configuración seleccionada (Tabla 3-10) es la de capa única, con una tubería por zanja instalada a una profundidad de 1,2 m. Esta profundidad es el mínimo exigido por la VDI 4640, que establece que el captador horizontal debe instalarse a no menos de 1,2 m por riesgo a congelación del suelo por encima de esa cota y no más de 1,5 m para una correcta absorción de la radiación solar. El hielo es un aislante que interrumpiría la transferencia de calor, degradando así las prestaciones del sistema.

Se ha descartado la configuración de doble capa superpuesta debido a las siguientes razones técnicas:

- No era compatible por el rango admisible de la VDI 4640 pues la separación vertical entre capas sería de solo 0,3 m teniendo que ser 0,5 m que, si se amplía a dicho número, las tuberías saldrían del rango recomendado.
- La interferencia térmica entre ambas capas próximas, lo que incrementaría el radio de influencia debido a la elevada conductividad del granito.
- La capa única a 1,2 m ofrece las condiciones óptimas de profundidad y separación para evitar la congelación y la interferencia térmica entre tuberías.
- Con una capa única, la separación entre zanjas es de 0,5 m, la anchura de zanja es de 0,3 m, que es suficiente para una sola tubería DN 32. La profundidad de excavación es de 1,3 m para respetar un 0,1 m de lecho de arena.

Parámetro geométrico	Valor
Superficie de captación de diseño	1.000 m ²
Separación entre ejes de zanjas	0,5 m
Longitud total de tubería PE	2.000 m
Longitud de cada zanja	60 m
Número de zanjas paralelas	34 zanjas

Parámetro geométrico	Valor
Anchura de cada zanja	0,3 m
Profundidad de la tubería (única capa)	1,2 m
Profundidad de excavación	1,3 m
Superficie total afectada por excavación	$34 \times 60 \times 0,5 = 1.020 \text{ m}^2$
Configuración por zanja	1 tubería PE-100 DN32 por zanja

Tabla 3-10 Parámetros geométricos del captador horizontal

3.5.7 Verificación del límite de extracción específica anual

La VDI 4640 y la Guía Técnica IDAE-09.3.04 establecen un límite de extracción anual de 50 a 70 kWh/(m²·año) para captadores horizontales, con el fin de garantizar que el terreno disponga de un tiempo suficiente para así regenerar su temperatura y no producir por el contrario un agotamiento térmico. El límite de 70 kWh/(m²·año) corresponde a suelos con conductividad térmica elevada, como puede considerarse el granito húmedo de Marín [1], [7].

La extracción específica anual real de la instalación se calcula como la energía total extraída del terreno en un año por la superficie de captación mediante la ecuación 16 y la ecuación 17.

$$E_{\text{terreno}} = \frac{E_{\text{calef}} \cdot (COP - 1)}{COP} = \frac{81.500 \text{ kWh} \cdot (4,8 - 1)}{4,8} = 81.500 \times 0,792 \quad (16)$$

$$= 64.500 \text{ kWh/año}]$$

$$q_{\text{anual}} = \frac{E_{\text{terreno}}}{S_{\text{diseño}}} = \frac{64.500 \text{ kWh/año}}{1.000 \text{ m}^2} = 64,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{año}) \quad (17)$$

Este valor es inferior al límite de 70 kWh/(m²·año), lo que confirma la sostenibilidad térmica a largo plazo de la instalación. Este resultado valida el dimensionamiento de la superficie de captación y confirma que el terreno dispondrá de tiempo y capacidad suficientes para regenerar su temperatura a lo largo del año, como se puede ver en la Tabla 3-11.

Verificación	Valor calculado	Límite VDI 4640	Resultado
Extracción específica anual	64,5 kWh/(m ² ·año)	50 – 70 kWh/(m ² ·año)	CUMPLE
ΔT fluido caloportador (operación normal)	< 12 K	$\leq 12 \text{ K}$ (semanal)	CUMPLE
ΔT fluido caloportador (pico)	< 18 K	$\leq 18 \text{ K}$ (pico)	CUMPLE
Profundidad de instalación (capa única)	1,2 m	$\geq 1,2 \text{ m}$ y $\leq 1,5 \text{ m}$	CUMPLE

Tabla 3-11 Verificación de los límites de la norma VDI 4640

3.6 Especificaciones técnicas de los componentes del captador

3.6.1 Tubería PE-100 PN10 DN32

Las tuberías del captador horizontal son el elemento en contacto directo con el terreno y deben cumplir simultáneamente requisitos mecánicos, resistencia a las presiones de trabajo y a los esfuerzos de instalación; térmicos, buena transmisión de calor entre el fluido y el terreno; químicos, resistencia a la corrosión del terreno y al fluido caloportador; y de durabilidad, la vida útil mínima de 50 años

enterradas. La opción estándar más recomendable es el polietileno de alta densidad PE-100. En la Tabla 3-12 se muestran las especificaciones técnicas del captador.

Característica	Especificación
Material	Polietileno de alta densidad PE-100
Norma de producto	UNE-EN 12201 (tuberías PE para agua a presión)
Diámetro exterior nominal	DN32 (32 mm)
Espesor de pared (SDR 11 PN10)	2,9 mm (diámetro interior 26,2 mm)
Presión nominal	PN10 (10 bar a 20 °C)
Temperatura de trabajo	-10 °C a +40 °C (con anticongelante)
Uniones	Termosoldadura por electrofusión
Conductividad térmica (PE)	0,39 W/(m·K)
Vida útil estimada	> 50 años enterrado
Longitud total que suministrar	≥ 2.200 m (2.100 m + 5% margen de obra)

Tabla 3-12 Especificaciones técnicas de la tubería del captador PE-100 PN10 DN32. (Tomado de: [17])

3.6.2 Fluido caloportador: agua con monopropilenglicol al 25%

El fluido caloportador que circula por el captador horizontal es una mezcla de agua y monopropilenglicol (MPG) al 25% el volumen. El monopropilenglicol es la opción recomendada para instalaciones geotérmicas horizontales gracias a su inocuidad ambiental (no es tóxico, clasificado como GRAS (Generally Recognized As Safe) por la FDA (Food and Drug Administration)) y a su punto de congelación de la mezcla al 25% de aproximadamente -10 °C y gracias a su amplia disponibilidad comercial.

La norma VDI 4640 y la Guía Técnica IDAE recomiendan un contenido de anticongelante entre el 20% y el 30%, con el criterio de que la temperatura mínima admisible del fluido captador debe ser como mínimo de entre 3-5 K superior a la temperatura de congelación de la mezcla. Con MPG al 25% y una temperatura mínima del fluido de diseño de -5 °C, el margen de seguridad de 5 K que es lo que se considera adecuado. En la Tabla 3-13 se muestran las propiedades del fluido caloportador.

Propiedad del fluido (MPG 25%, T = 0 °C)	Valor
Concentración monopropilenglicol	25% vol.
Punto de congelación	-10 °C
Densidad (ρ)	1.030 kg/m ³
Calor específico (Cp)	3,8 kJ/(kg·K)
Viscosidad dinámica	3,5 mPa·s
Conductividad térmica	0,48 W/(m·K)
Temperatura mínima fluido captador (diseño)	-5 °C
Temperatura máxima fluido captador	+30 °C (modo refrigeración)

Tabla 3-13 Propiedades del fluido caloportador. (Tomado de: [1])

3.6.3 Colectores de distribución (manifolds)

Los colectores de distribución son el elemento de conexión entre los circuitos individuales de las zanas y el circuito principal que alimenta la bomba de calor. Según la Guía Técnica IDAE, los colectores

tienen como misión distribuir el caudal total de forma equilibrada entre todos los circuitos, asegurar el correcto purgado del aire y permitir el aislamiento y regulación individualizada de cada circuito.

Dado que se tienen 34 zanjas agrupadas en bloques de 7, se instalarán 5 colectores manifold de 7 salidas cada uno. Los colectores se ubicarán en arquetas enterradas distribuidas a lo largo del campo de captación, a una profundidad aproximada de 0,8 m, conectados mediante tuberías de mayor diámetro (DN50 PN10) a la sala de máquinas del edificio. En la Tabla 3-14 se muestran los parámetros hidráulicos del circuito de captación.

Parámetro hidráulico	Cálculo y valor
Caudal total captador (calor extraído del terreno)	$Q_{\text{terreno}} / (\rho \cdot C_p \cdot \Delta T) = 31.700 / (1030 \times 3800 \times 5) \approx 1,56 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 5,6 \text{ m}^3/\text{h}$
ΔT diseño circuito captador	5 K (temperatura de ida -2 °C, retorno +3 °C)
Caudal por zanja (35 zanjas)	$5,6 \text{ m}^3/\text{h} \div 35 = 0,16 \text{ m}^3/\text{h} = 2,7 \text{ l/min}$ por zanja
Velocidad del fluido en tubería DN32	$0,16 \text{ m}^3/\text{h} \div (\pi/4 \times 0,0262^2) \approx 0,083 \text{ m/s}$
Pérdida de carga por zanja (60 m)	0,3 – 0,5 (estimación)
Número de colectores manifold	5 colectores de 7 circuitos c/u

Tabla 3-14 Parámetros hidráulicos del circuito de captación

3.7 Distribución interior: sistema de fancoils

3.7.1 Justificación de la solución adoptada

La distribución del calor y del frío generado por la bomba de calor geotérmica en el interior del Isaac Peral se realizará mediante fancoils. Esta solución se adopta frente a la alternativa del suelo radiante por razones técnicas y económicas que se detallan a continuación.

El edificio Isaac Peral fue construido en 1959 con soleras de hormigón y pavimentos cerámicos originales que en muchos casos se conservan. La instalación de suelo radiante requeriría levantar la totalidad del pavimento en las dos plantas climatizadas, colocar el panel aislante, tender la tubería de polietileno reticulado, verter una nueva capa de mortero autonivelante de 5 cm de espesor y reponer el pavimento. Esta intervención implica una obra civil de gran envergadura, una elevación del nivel del suelo que afectaría a puertas, umbralillos y accesos, y la interrupción completa de la actividad docente durante varios meses. El coste estimado de esta obra supera los 100.000 € lo que inviabiliza económicamente la solución.

Existe además una razón funcional y es que el suelo radiante tiene una inercia térmica muy elevada pues tarda entre 2-4 horas en alcanzar la temperatura de confort desde frío. En un edificio como el Isaac Peral con el régimen de uso de 10 horas diarias, el tiempo necesario para alcanzar el confort térmico sería de entre 5 y 6 horas. Los fancoils, por el contrario, alcanzan la temperatura consigna en aproximadamente 20 minutos, lo que los hace idóneos para el perfil de uso discontinuo del Isaac Peral.

3.7.2 Implicación del fancoil en el COP de la bomba de calor

La elección del sistema de emisión tiene una consecuencia directa sobre el rendimiento de la bomba de calor geotérmica, que es necesario cuantificar para que el dimensionamiento sea coherente.

El COP de una bomba de calor geotérmica depende fundamentalmente de la diferencia de temperatura entre el foco frío y el foco caliente (Tabla 3-15). Cuanto menor es la diferencia, mayor es el COP. Esta es la razón por la que el suelo radiante, que trabaja a una temperatura de impulsión entre 35-40 °C, produce un COP más alto que los fancoils que requieren temperaturas de impulsión de 45-50 °C para vencer la resistencia térmica convectiva del intercambiador con menor superficie.

Sistema de emisión	T impulsión (°C)	T retorno (°C)	COP estimado BDC
Suelo radiante	35 – 40	28 – 33	4,5 – 5,0
Fancoil de baja temperatura	40 – 45	33 – 38	4,2 – 4,5
Fancoil estándar (adoptado)	45 – 50	38 – 43	3,8 – 4,0
Radiadores convencionales	55 – 70	45 – 55	3,2 – 3,5

Tabla 3-15 COP de la bomba de calor geotérmica según el sistema de emisión interior. (Tomado de: [1], [7])

Para el presente estudio se adopta un COP de 3,9 como valor representativo para fancoils estándar con temperatura de impulsión de aproximadamente 47 °C. Este valor proporciona, a su vez un margen de seguridad en el dimensionamiento.

3.7.3 Características técnicas de los fancoils

Los fancoils seleccionados (Tabla 3-16) para la instalación son equipos de dos tubos reversibles, de montaje de mural o de techo según la distribución de cada espacio. Cada unidad incorpora ventilador de velocidad variable, filtro de aire, válvula de control de vía doble motorizada y un termostato ambiente con programación horaria.

Parámetro	Valor de diseño
Temperatura de impulsión en calefacción	47 °C
Temperatura de retorno en calefacción	40 °C
Temperatura de impulsión en refrigeración	7 °C
Temperatura de retorno en refrigeración	12 °C
Salto térmico de diseño del circuito interior	7 K
Caudal total circuito interior (calefacción)	$Q_{BDC} / (\rho \cdot C_p \cdot \Delta T) = 40.000 / (1.000 \times 4.187 \times 7)$ $\approx 1,36 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 4,9 \text{ m}^3/\text{h}$
Tipo de circuito	2 tubos reversibles (impulsión + retorno)
Control	Termostato ambiente por zona / aula
Filtro de aire	G3 (partículas gruesas) — mantenimiento semestral

Tabla 3-16 Parámetros de diseño del circuito de fancoils

3.7.4 Distribución de unidades por potencia y espacio

La potencia punta de calefacción del edificio es de 115 kW (condición de diseño a una temperatura exterior de 0 °C). La bomba de calor de 40 kW cubre el 35% de dicha potencia punta, siendo el resto cubierto por las resistencias de apoyo en las pocas horas más frías del año. Para el funcionamiento en régimen normal, con una temperatura exterior superior a 5 °C, que representa más del 95% de horas lectivas de invierno en Marín, los 40 kW de la bomba de calor son suficientes.

Los fancoils se distribuyen por zonas funcionales del edificio (Tabla 3-17). La potencia asignada a cada zona se determina proporcionalmente a sus superficie e intensidad de uso, con mayor dotación los laboratorios debido a la carga de equipos y menos a los pasillos y zonas de paso.

Zona	Superficie (m²)	Potencia calef. (kW)	Potencia refrig. (kW)	N.º fancoils estimado
Aulas (12 aulas × 60 m ²)	720	17,3	4,3	12 uds. (1,5 kW c/u)
Laboratorios (5 labs × 80 m ²)	400	9,6	2,4	10 uds. (1,0 kW c/u)
Despachos profesores	200	4,8	1,2	5 uds. (1,0 kW c/u)
Pasillos y zonas comunes	530	6,4	1,6	6 uds. (1,1 kW c/u)
Talleres mecánicos	250	6,0	1,5	5 uds. (1,2 kW c/u)
TOTAL	2.100	44,1 kW	11,0 kW	38 unidades

Tabla 3-17 Distribución estimada de fancoils por zonas

La potencia total instalada en fancoils (~44 kW) es ligeramente superior a la potencia nominal de la bomba de calor (40 kW), lo que es correcto: los fancoils deben poder disipar toda la potencia disponible de la BDC con un pequeño margen. En las horas más frías, las resistencias de apoyo integradas en la BDC complementan la aportación del captador geotérmico.

3.7.5 Red hidráulica interior

La red hidráulica interior, conecta la bomba de calor con los fancoils mediante un circuito de dos tubos, uno de impulsión y otro de retorno, en distribución de anillo o árbol. Las tuberías serían de acero negro DIN 2440 con aislamiento térmico de coquilla de espuma elastomérica de 10 mm de espesor para la red de calefacción y de 25 mm para la red de refrigeración, para evitar así condensaciones en la superficie exterior.

Cada fancoil dispondrá de una válvula de dos vías motorizada y controlada por el termostato de cada zona permitiendo la modulación del caudal y la independencia de cada espacio. La bomba circuladora del circuito interior será de velocidad variable, dimensionada para el caudal total de diseño, lo que supone una potencia de la bomba de entre 80 y 120 W.

4 RESULTADOS

4.1 Resumen de los resultados

El proceso de cálculo desarrollado en el capítulo 3 permite obtener los parámetros definitivos de la instalación geotérmica horizontal para el edificio Isaac Peral. La Tabla 4-1 que se relaciona a continuación recoge los principales resultados.

Parámetro	Valor
Coefficiente global de pérdidas UA	5.500 W/K
Demanda real anual de calefacción	81.500 kWh/año
Demanda anual de refrigeración	3.200 kWh/año
Potencia punta de calefacción	115 kW
Potencia nominal BDC seleccionada	$2 \times 20 \text{ kW} = 40 \text{ kW}$
COP calefacción adoptado	4,8
Potencia a extraer del terreno	31,7 kW
Extracción específica adoptada (VDI 4640)	25 W/m ²
Superficie de captación de diseño	1.000 m ²
Longitud total de tubería PE-100	2.040 m
Número de zanjas paralelas	34 zanjas de 60 m
Profundidad de instalación	1,2 m (capa única)
Extracción específica anual real	64,5 kWh/(m ² ·año)
Número de fancoils	38 unidades

Tabla 4-1 Resumen de resultados del dimensionamiento de la instalación geotérmica

En la Figura 4-1 se puede apreciar un esquema simplificado de la instalación final propuesta, en el que se representa la disposición conjunta de todos los subsistemas que la componen. De izquierda a derecha, pueden identificarse los tres circuitos principales que integran la solución de climatización: el circuito de captación geotérmica exterior, la bomba de calor geotérmica y el circuito de distribución interior.



Figura 4-1 Esquema de la instalación geotérmica. (Elaboración propia a partir de [30])

4.2 Análisis de los resultados

A continuación, se procede a analizar los resultados que se han obtenido a lo largo del presente trabajo.

4.2.1 La demanda térmica

La demanda de calefacción real de 81.500 kWh/año es resultado de la aplicación del factor de utilización F_u sobre la demanda bruta de 100.100 kWh/año, siendo, por tanto, la corrección del 18,6%. Esta corrección refleja el efecto combinado de las ganancias solares y de ocupación, además de la operación intermitente de la bomba de calor en los meses de entretiempo, especialmente en los meses de septiembre y mayo donde el factor de utilización se reduce hasta alcanzar valores de entre 0,45 y 0,55 por la importancia de las ganancias libres en los mencionados meses. La demanda de refrigeración de 3.200 kWh/año es muy inferior a la de calefacción pues representa apenas el 3,8% de la demanda total anual, que es coherente con el clima atlántico reinante en la villa de Marín, con veranos frescos acompañado de la falta de uso del edificio en los meses más calurosos del año a consecuencia de las prácticas y el permiso de verano de los alumnos.

4.2.2 Selección de la bomba de calor geotérmica

La potencia nominal de 40 kW representa el 34,8 % de la potencia punta teórica de 115 kW. Este porcentaje puede parecer bajo, pero es coherente con la práctica habitual en edificios docentes con un uso discontinuo. La condición de diseño extrema de 0 °C solo se registra en Marín en unas 43 horas al año [15], prácticamente siempre de madrugada cuando el edificio está cerrado, por lo que no justifica el dimensionamiento de las unidades a plena carga punta. Considerando que durante el horario lectivo la temperatura exterior rara vez desciende de 5-6 °C, que la elevada masa térmica de los muros de 45 cm amortigua los picos de demanda, y que el uso discontinuo del edificio reduce drásticamente la demanda efectiva, la carga real durante las horas de uso habitual es de 38-42 kW. Se seleccionan por tanto dos unidades Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai de 20 kW conectadas en paralelo con control en cascada, con una potencia total de 40 kW y COP de 4,8 en condiciones W10/W35 según EN 14511 [32],

complementadas con resistencias eléctricas de apoyo de 5 kW por unidad que cubren los arranques en los días más fríos con un impacto marginal sobre el consumo anual.

4.2.3 Captador geotérmico horizontal

La superficie de captación es de 1.000 m² que resultan de aplicar el factor corrector por operación reversible sobre la superficie inicial bruta con lo que se reduce en un 15 % respecto a lo que requeriría una instalación con únicamente calefacción. Esta reducción se justifica gracias a que, durante los periodos de refrigeración, el captador inyecta calor al terreno, recargando este térmicamente y compensando así, en parte, la extracción que se realiza durante el resto del año. La configuración de una única capa a una profundidad de 1,2 m con 34 zanjas de 60 m con una separación de 0,5 m entre ejes es la solución óptima pues maximiza el contacto con. La zona de mayor variación estacional de temperatura evitando, además, interferencias térmicas entre zanjas adyacentes.

4.2.4 Fancoils

La instalación de 38 fancoils distribuidos a lo largo del edificio con una potencia total instalada de 44 kW, proporciona un margen del 10 % sobre la potencia nominal de la bomba de calor, lo que garantiza que la bomba de calor pueda entregar toda su potencia disponible en cualquier condición de operación. La distribución por zonas, con mayor dotación en aulas y laboratorios, permite un control individualizado de la temperatura en cada espacio y una operación eficiente al poder apagar las unidades de las zonas no ocupadas.

4.3 Validación frente a los límites normativos

La instalación dimensionada cumple con todos los criterios establecidos por la norma VDI 4640 [7] y la Guía Técnica IDAE [1], como se representa en la Tabla 4-2

Criterio de verificación	Valor calculado	Límite normativo	Resultado
Extracción específica anual	64,5 kWh/(m ² ·año)	50 – 70 kWh/(m ² ·año)	CUMPLE
ΔT fluido caloportador (régimen normal)	< 12 K	≤ 12 K	CUMPLE
ΔT fluido caloportador (pico)	< 18 K	≤ 18 K	CUMPLE
Profundidad de instalación	1,2 m	$\geq 1,2$ m y $\leq 1,5$ m	CUMPLE
Concentración anticongelante MPG	25 % vol.	20 – 30 % vol.	CUMPLE

Tabla 4-2 Verificación de los límites normativos de la instalación

El valor de extracción específica anual de 64,5 kWh/(m²·año) se sitúa dentro del rango admisible para suelos de alta conductividad térmica, con un margen del 7,9 % respecto al límite superior de 70 kWh/(m²·año). Este margen es suficiente para absorber posibles variaciones en las condiciones reales de operación, como años con inviernos más fríos que la media o incrementos en el tiempo de uso del edificio, todo ello sin comprometer la sostenibilidad térmica a largo plazo del captador.

4.4 Comparación con estudios previos del Isaac Peral

Como validación adicional, los resultados obtenidos son coherentes con los resultados previos realizados sobre el mismo edificio. La demanda de calefacción calculada de 81.500 kWh/año es comparable con la de 87.000 kWh/año obtenida por Rubiera Quesada [11] mediante simulación TRNSYS, existiendo una diferencia del 6,3 %. Esta diferencia es esperable y se explica por las diferencias metodológicas entre ambos enfoques. El método de grados-día que se ha utilizado en el presente estudio, trabaja con temperaturas medias mensuales y con un factor de utilización agregado, mientras que TRNSYS realiza una simulación horaria completa que tiene en cuenta de forma más precisa la variación hora a hora de la radiación solar, la temperatura exterior y la inercia térmica de la envolvente. En general, el método de grados-día, tiende a subestimar ligeramente la demanda real respecto a la simulación dinámica debido a la simplificación del factor de utilización que provoca que no exista la

misma precisión de todos los efectos de las ganancias libres, lo que explica que el resultado sea ligeramente inferior.

El consumo real de gas del Isaac Peral en 2018 fue de 117.390 kWh [5], que con un rendimiento de caldera del 85-90 %, corresponde a una demanda útil real entre 99.800 y 105.700 kWh. La diferencia respecto a los 81.500 kWh calculados se explica por dos razones principales. En primer lugar, el método de grados-día lectivos que se ha empleado en este estudio, contabiliza únicamente los días de uso lectivo con 10 horas diarias de funcionamiento, excluyendo así los fines de semana y los periodos no lectivos en los que el edificio puede mantener una temperatura mínima de guardia lo que supondría un consumo, aunque muy reducido. En segundo lugar, los datos de consumo de 2018 corresponden al sistema de caldera de gas que tiene una inercia de arranque y parada distinta a la bomba de calor geotérmica lo que se puede traducir en un consumo algo superior al estrictamente necesario para cubrir la demanda. El orden de magnitud es coherente y confirma que la instalación no está sobredimensionada.

Es relevante señalar además que el consumo del edificio muestra una tendencia creciente en los últimos años. El consumo anual de 2025 fue de 153.500 kWh, un 30,7 % superior al de 2018, y en los meses de enero y febrero de 2026 se supera ampliamente los valores de 2018 para el mismo periodo. La clara tendencia al alza refuerza la justificación de la instalación geotérmica, cuyo consumo eléctrico es independiente de la evolución del precio del gas y cuyos costes de operación son significativamente más estables a largo plazo.

4.5 Análisis del ahorro energético y reducción de emisiones de CO₂

Una de las principales ventajas de la instalación geotérmica frente al sistema actual de caldera de gas es la reducción del consumo de energía y de las emisiones de CO₂ asociadas. A continuación, se cuantifica este ahorro para las condiciones de operación del Isaac Peral.

4.5.1 Consumo eléctrico de la bomba de calor

Con una demanda real de calefacción de 81.500 kWh/año y un COP de 4,8, el consumo eléctrico anual de la bomba de calor se obtiene con la ecuación 18.

$$W_{\text{comp}} = \frac{E_{\text{calef}}}{COP} = \frac{81.500}{4,8} = 16.996 \text{ kWh/año} \quad (18)$$

Añadiendo el consumo de las bombas de circulación del captador y del circuito interior, estimado en 1.500 kWh/año, el consumo eléctrico total anual de la instalación geotérmica es de aproximadamente 18.500 kWh/año.

4.5.2 Comparación de consumo con el sistema actual

El sistema actual de caldera de gas consume gas natural para producir la misma energía útil de calefacción. Con un rendimiento de caldera del 90 % y la demanda real de 81.500 kWh/año, el consumo de gas necesario se calcula con la ecuación 19.

$$E_{\text{gas}} = \frac{E_{\text{calef}}}{\eta_{\text{caldera}}} = \frac{81.500}{0,90} = 90.556 \text{ kWh/año} \approx 90.600 \text{ kWh}_{\text{gas}}/\text{año} \quad (19)$$

La Tabla 4-3 compara el consumo energético y las emisiones de CO₂ de ambos sistemas:

Concepto	Sistema actual (gas)	Instalación geotérmica	Ahorro
Energía útil de calefacción	81.500 kWh/año	81.500 kWh/año	—
Energía primaria consumida	90.600 kWh _{gas} /año	22.400 kWh _{electricidad} /año	—
Factor de emisión	0,202 kg CO ₂ /kWh	0,181 kg CO ₂ /kWh	—
Emisiones de CO ₂	18.310 kg CO ₂ /año	3.349 kg CO ₂ /año	14.961 kg CO ₂ /año
Reducción de emisiones	—	—	81,7%

Tabla 4-3 Comparación de consumo energético y emisiones de CO₂. (Tomado de: [3] [23])

La instalación geotérmica permite reducir las emisiones de CO₂ del edificio Isaac Peral en 14.961 kg CO₂/año, lo que representa una reducción del 81,7 % respecto al sistema actual de caldera de gas. Esta reducción es especialmente significativa teniendo en cuenta que el factor de emisión del mix eléctrico español tiene una tendencia creciente hacia energías renovables con una proyección según el PNIEC de alcanzar el 74 % de generación renovable en 2030 [4]. Esto significa que el ahorro de emisiones de la instalación geotérmica aumentará progresivamente con el tiempo sin que se modifique la instalación.

En términos de energía primaria, la reducción es igualmente relevante. El sistema de caldera consume 90.600 kWh de gas natural al año, para llegar a la demanda calculada para la instalación geotérmica, que se trata de una energía fósil no renovable e importada en su mayoría. La instalación geotérmica, por otra parte, consume 18.500 kWh de electricidad al año, de los cuales más del 50 % proceden ya en 2026 de fuentes renovables según datos de REE [20], lo que sitúa el consumo de energía primaria no renovable de la instalación geotérmica en aproximadamente 9.250 kWh/año, lo que supone una reducción del 87,6 % de las emisiones respecto al sistema de gas.

4.6 Discusión sobre las limitaciones del método

El dimensionamiento realizado en el presente TFG está basado en métodos simplificados que son adecuados para la fase de diseño preliminar pero que presentan limitaciones inherentes que deben tenerse en cuenta antes de acometer el proyecto ejecutivo.

4.6.1 Método de grados-día

El método de grados-día empleado para estimar la demanda de calefacción es un método de orden de magnitud que asume una proporcionalidad lineal entre la carga del edificio y la temperatura exterior. Esta hipótesis es razonablemente válida para un edificio de gran inercia térmica como es el caso del Isaac Peral, pero no captura efectos como la variación horaria de la radiación solar, los puentes térmicos localizados, la infiltración dependiente del viento ni la distribución no uniforme de temperaturas en el interior del edificio. Para una simulación más precisa, sería necesario recurrir a herramientas de simulación dinámica como TRNSYS, como en el estudio realizado por Rubiera Quesada [11] sobre el Isaac Peral.

4.6.2 Caracterización del subsuelo

La principal limitación del dimensionamiento es la ausencia de un Test de Respuesta Geotérmica (TRT). Los valores de conductividad térmica y extracción específica empleados proceden de tablas de la norma VDI 4640 [7] y se han asignado por analogía con la litología identificada en la cartografía del IGME [6]. Sin embargo, la conductividad térmica real del granito puede variar localmente en función del grado de alteración, la densidad de fracturación y el grado de saturación hídrica, parámetros que solo se pueden determinar con realizando el TRT. Dado que la potencia de la instalación supera el umbral de los 30 kW establecido por la VDI 4640 para la aplicación directa de su método simplificado, el TRT es obligatorio en la fase ejecutiva y podría dar lugar a un ajuste de la superficie de captación de entre el $\pm 15\%$ y el $\pm 25\%$ respecto al valor dimensionado.

4.6.3 Simplificaciones en el cálculo de la potencia punta

La potencia punta de 115 kW calculada es un valor térmico que supone el edificio a plena carga de ocupación en el instante de temperatura exterior mínima es una condición que en la práctica nunca se produce simultáneamente. La inercia térmica de los muros de 45 cm de ladrillo y hormigón retrasa varias horas la respuesta del edificio a las variaciones de temperatura exterior, lo que reduce la potencia punta real respecto a la calculada. Una simulación dinámica permitiría cuantificar este efecto y posiblemente confirmar que la bomba de calor reversible de 40 kW, complementada con las resistencias de apoyo, es suficiente para cubrir la demanda en todas las condiciones de operación.

4.7 Estimación del coste de la instalación

El coste total de la instalación geotérmica se desglosa en cinco partidas principales: equipos mecánicos, el sistema de fancoils de distribución interior, el propio captador geotérmico, obra civil y trabajos de instalación eléctrica, legalización y puesta en marcha. La Tabla 4-4 recoge la estimación detallada por partidas:

Partida	Coste estimado (€)	% sobre total
Equipos mecánicos (BDC, bombas, control, acumulación)	22.090	17,2%
Captador geotérmico horizontal (tubería, anticongelante, colectores, arquetas)	15.450	12,0%
Sistema de distribución interior (38 fancoils, red hidráulica, termostatos)	26.060	20,3%
Obra civil (excavación, relleno, reposición pista, sala de máquinas)	51.308	40,0%
Instalación eléctrica, TRT, legalización y puesta en marcha	11.600	9,0%
Subtotal sin IVA	126.508	98,5%
Imprevistos (3%)	3.795	3,0%
Honorarios proyecto ejecutivo (5%)	6.325	4,9%
COSTE TOTAL ESTIMADO (sin IVA)	136.628	100%

Tabla 4-4 Estimación del coste total de la instalación geotérmica por partidas. (Tomado de: precios de mercado 2025. IVA no incluido)

La partida de mayor peso es la obra civil, que representa el 40% del coste total. Este porcentaje es característico de las instalaciones de captación horizontal en edificios existentes, donde la excavación de 34 zanjas de 60 m, el relleno y compactación y especialmente la reposición de la pista militar afectada representan costes significativos. Las partidas de equipos y distribución interior suman conjuntamente el 37,5% del coste total, mientras que los honorarios del proyecto y los imprevistos constituyen una reserva razonable dado el nivel de diseño del presente estudio. Costes anuales de operación y ahorro económico.

El ahorro económico anual de la instalación geotérmica se obtiene como diferencia entre el coste de operación del sistema actual de caldera de gas y el de la instalación geotérmica propuesta, como se observa en la Tabla 4-5. Los precios de referencia empleados son los precios medios del gas natural y la electricidad para el sector terciario en España en 2025: 0,065 €/kWh para el gas natural y 0,18 €/kWh para la electricidad [4] [20].

Concepto	Sistema actual — gas (€/año)	Instalación geotérmica (€/año)
Energía (gas / electricidad)	5.892	3.330
Mantenimiento preventivo anual	1.200	800
Revisión oficial bienal (prorratio)	300	200
Reposición anticongelante (cada 5 años, prorratio)	—	120
Limpieza filtros fancoils (semestral)	—	200
Seguro instalación	150	200
TOTAL COSTE OPERACIÓN ANUAL	7.542	4.850

Tabla 4-5 Costes anuales de operación y mantenimiento comparados. (Tomado de: precios energía: gas 0,065 €/kWh, electricidad 0,18 €/kWh para 2025)

El ahorro total anual, considerando tanto la energía como los costes de mantenimiento, es de 2.692 €/año. Aplicando el mismo cálculo al consumo real del edificio en el año 2025, el ahorro energético estimado asciende a 5.127 €/año, elevando el ahorro total incluyendo el mantenimiento a aproximadamente 5.327 €/año. La instalación geotérmica presenta, además, un coste de mantenimiento algo inferior al de una caldera de gas, al no requerir revisiones ni de combustión ni limpieza de quemadores.

Los precios de referencia empleados se obtienen del Informe de Supervisión de los Mercados Minoristas de Gas y Electricidad 2024 de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) [34] y de las estadísticas de precios de energía de Eurostat para el primer semestre de 2024. Para el gas natural en el sector terciario, el precio final al consumidor se sitúa en el entorno de 0,065 €/kWh en 2024, coherente con el precio medio en MIBGAS de 34,76 €/MWh más los costes regulados de acceso a red [34]. Para la electricidad en el sector terciario, el precio final se sitúa en torno a 0,18 €/kWh en 2024, valor que Eurostat registra para consumidores no domésticos españoles [35].

4.8 Período de retorno de la inversión

El período de retorno simple es el cociente entre la inversión inicial y el ahorro anual total. La Tabla 4-6 recoge los resultados para distintos escenarios combinando el nivel de reducción de inversión y el consumo estimado.

Escenario	Inversión neta (€)	Ahorro anual (€/año)	Payback (años)
Sin reducción de inversión, consumo grados-día	136.628	2.692	50,8
Sin reducción de inversión, consumo real 2025	136.628	5.127	26,7
Reducción inversión 30% (FEDER AGE + reposición caldera)	95.640	5.127	18,7
Reducción inversión 40% (FEDER AGE + reposición caldera)	81.977	5.127	16
Reducción inversión 50% (FEDER AGE + reposición caldera)	68.314	5.127	13,3
Reducción inversión 40% + precio gas +20%	81.977	6.127	13,4

Tabla 4-6 Período de retorno simple en función del escenario de reducción de inversión y consumo

El período de retorno sin reducción de inversión es elevado, lo que es habitual en instalaciones geotérmicas horizontales en edificios existentes donde la obra civil domina el coste. En cuanto a la financiación pública, las subvenciones del IDAE canalizadas a través de las Comunidades Autónomas, como el Programa de Incentivos para Energías Renovables Térmicas (RD 1124/2021) o el Programa PREE, están dirigidas al sector privado y a las administraciones locales, y no son directamente accesibles por el Ministerio de Defensa como organismo de la Administración General del Estado (AGE). La vía de financiación aplicable a este caso es el Plan de reducción del consumo energético en la AGE, para el que el IDAE convocó en octubre de 2024 expresiones de interés para la selección de proyectos de rehabilitación energética en edificios e infraestructuras de la AGE, cofinanciados con fondos Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) 2021-2027 con una dotación de 391,7 millones de euros [36]. El Ministerio de Defensa puede participar en esta convocatoria a través de sus Subsecretarías, presentando proyectos que cumplan los requisitos energéticos establecidos. Adicionalmente, el Ministerio dispone de sus propias partidas presupuestarias para inversión en eficiencia energética e infraestructuras, gestionadas a través de la Dirección de Asuntos Económicos (DAE) y la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) [9]. En este contexto, la tabla 4-6 emplea el concepto de "reducción de inversión" para englobar tanto la cofinanciación FEDER como la reasignación del presupuesto de renovación de la caldera existente, cuyo coste de sustitución convencional se estima en 15.000-20.000 €, reduciendo el diferencial de inversión adicional respecto a una renovación convencional del sistema de gas.

4.9 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía

La rentabilidad de la instalación depende directamente de los precios relativos del gas y la electricidad. La Tabla 4-7 muestra el período de retorno para distintas combinaciones de precios, calculado con la inversión sin reducción y con el consumo real de 2025.

Precio gas (€/kWh)	Precio electricidad (€/kWh)	Ahorro total (€/año)	Payback sin reducción inversión (años)	Payback reducción inversión 40% (años)
0,055	0,22	2.680	51,0	30,6
0,065	0,18	5.127	26,7	16
0,080	0,18	7.432	18,4	11
0,085	0,15	9.282	14,7	8,8
0,120 (<i>crisis</i> 2022)	0,25	11.997	11,4	6,8

Tabla 4-7 Análisis de sensibilidad del período de retorno frente a precios de la energía. (Fuente: elaboración propia a partir de [34], [35])

El análisis muestra que incluso en el escenario más pesimista, con gas barato y electricidad cara, el ahorro sigue siendo positivo, aunque el período de retorno resulta muy elevado. La tendencia estructural de la política energética europea, basada en el encarecimiento progresivo del gas por los costes de CO₂ del mercado ETS y el abaratamiento de la electricidad por la mayor penetración renovable prevista en el PNIEC [4], favorece la rentabilidad a largo plazo de la instalación. En el escenario base, con precios del gas de 0,065 €/kWh y electricidad de 0,18 €/kWh, representativos del mercado español en 2024 [34], [35], el período de retorno sin reducción de inversión sobre el consumo real es de 26,7 años, y con una reducción del 40% mediante financiación FEDER para la AGE [36] se reduce a 16,0 años, compatible con la vida útil de la bomba de calor. En escenarios de precios del gas superiores a 0,080 €/kWh, nivel en torno al que oscila el mercado europeo desde 2022 [34], el retorno sin reducción de inversión baja de 19 años y con reducción del 40% a menos de 11 años.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha desarrollado el diseño de una instalación geotérmica de muy baja entalpía con captación horizontal en circuito cerrado para el edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar, alcanzándose todos los objetivos planteados, con la salvedad que se indica en relación con la caracterización del subsuelo.

La demanda térmica del edificio se ha estimado mediante el método de los grados-día aplicado sobre el coeficiente global de pérdidas $UA = 5.500 \text{ W/K}$ y los datos climáticos de la estación de Marín de AEMET para la serie 1981-2010, obteniéndose una demanda real de calefacción de 81.500 kWh/año y una demanda de refrigeración de 3.200 kWh/año. El resultado es coherente con los 87.000 kWh/año obtenidos por Rubiera Quesada [11] mediante simulación dinámica TRNSYS, con una diferencia del 6,3% atribuible a las diferencias metodológicas entre ambos enfoques. El consumo real del edificio en 2025, de 153.500 kWh de gas [5], supera el valor calculado por grados-día lectivos, lo que es esperable dado que el método no captura los periodos de baja ocupación ni el funcionamiento de guardia.

La potencia punta de calefacción calculada según la norma UNE-EN 12831 [16] es de 115 kW para la condición de diseño de 0 °C de temperatura exterior, que se registra en Marín en unas 43 horas al año [15], prácticamente siempre de madrugada cuando el edificio está cerrado. Teniendo en cuenta que durante el horario lectivo la temperatura exterior rara vez desciende de 5-6 °C, que la elevada masa térmica de los muros de 45 cm amortigua los picos de demanda, y que el uso discontinuo del edificio reduce drásticamente la demanda efectiva, la carga real durante las horas de uso habitual es de 38-42 kW. Se seleccionan dos unidades Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai de 20 kW conectadas en paralelo con control en cascada, con una potencia total de 40 kW y COP de 4,8 en condiciones W10/W35 según EN 14511 [32], complementada con resistencias eléctricas de apoyo de 5 kW que cubren los arranques en los días más fríos con un impacto marginal sobre el consumo anual [1].

El subsuelo de la parcela ha sido caracterizado mediante consulta de la hoja 185 del MAGNA [6], identificando el granito hercínico húmedo como material dominante, con propiedades termofísicas favorables para la captación horizontal. No obstante, los valores de conductividad térmica adoptados proceden de tablas normativas [7], [18] y no de un ensayo directo sobre el terreno. Dado que la potencia nominal supera el umbral de 30 kW de la VDI 4640, la realización de un Test de Respuesta Térmica es obligatoria en la fase de proyecto ejecutivo y podría modificar la superficie de captación entre un $\pm 15\%$ y un $\pm 25\%$ respecto al valor calculado, constituyendo la principal incertidumbre del presente trabajo.

A partir de la caracterización del terreno se ha dimensionado un captador de 1.000 m² organizado en 34 zanjas paralelas de 60 m a 1,2 m de profundidad, con una longitud total de tubería PE-100 DN32 de 2.040 m y fluido caloportador de agua con monopropilenglicol al 25%. La extracción específica anual

de 60,6 kWh/(m²·año) se sitúa dentro del rango admisible de 50-70 kWh/(m²·año) establecido por la VDI 4640 [7] y la Guía Técnica IDAE [1], con un margen del 7,9% respecto al límite superior que garantiza la sostenibilidad térmica a largo plazo del captador.

Para el sistema de distribución interior se ha seleccionado una solución de fancoils frente al suelo radiante y los radiadores, por su compatibilidad con las temperaturas de trabajo de la bomba de calor (35-45 °C), su flexibilidad de control por zonas y su menor coste de instalación en un edificio existente. Se han dimensionado 38 unidades terminales con una potencia total instalada de 44 kW, que proporciona un margen del 10% sobre la potencia nominal de la bomba de calor.

Desde el punto de vista energético y ambiental, La instalación reduce el consumo de energía primaria en un 79,6% respecto al sistema actual de gas natural y las emisiones de CO₂ en un 81,7%, equivalente a 14.961 kg CO₂/año [20], [33]. El ahorro económico anual es de 2.692 €/año sobre el consumo calculado por grados-día y de 5.127 €/año sobre el consumo real de 2025. El período de retorno sin reducción de inversión es de 26,7 años sobre el consumo real, y con una reducción del 40% mediante financiación FEDER para la AGE [36] se reduce a 16,0 años.

Como conclusión general, la instalación geotérmica horizontal propuesta para el edificio Isaac Peral es técnicamente viable, normativamente conforme y medioambientalmente justificada. La selección de una bomba de calor de 40 kW frente a los 115 kW de potencia punta teórica responde a criterios de uso real del edificio y no supone una deficiencia del diseño, puesto que la condición de diseño extrema nunca coincide en la práctica con el horario de uso del edificio y las resistencias de apoyo garantizan el confort en los escasos episodios de frío extremo. La realización del TRT en la fase de proyecto ejecutivo es el paso necesario para confirmar el dimensionamiento del captador y avanzar hacia la licitación de la obra.

5.2 Líneas futuras

El presente trabajo constituye un diseño de nivel de anteproyecto. Las siguientes líneas de trabajo permitirían ampliar su alcance y reforzar la justificación de la inversión ante los órganos competentes de la ENM.

La primera línea es la extensión a otros edificios del recinto de la ENM. La metodología desarrollada en este TFG es directamente aplicable a otros edificios de la Escuela Naval Militar de Marín. En el caso del cuartel Francisco Moreno, para el que Díaz del Río Oleaga [13] y De las Heras Gutiérrez de la Cámara [14] ya analizaron alternativas de climatización, el presente trabajo aporta una referencia metodológica actualizada. En el caso del edificio Marqués de la Victoria, cuyo diseño geotérmico no ha sido abordado hasta la fecha, sería de gran interés desarrollar un estudio equivalente al presente, dadas las similitudes en cuanto a condiciones geológicas, clima y marco institucional. A medio plazo, disponer de diseños para varios edificios de la Escuela Naval Militar abriría la posibilidad de evaluar un sistema geotérmico integrado con una central de producción centralizada, optimizando el coste por unidad de potencia instalada y reduciendo el impacto de la obra civil.

La segunda línea es la realización de un estudio económico con análisis de ciclo de vida completo. El estudio económico de este trabajo podría ampliarse incorporando un análisis de ciclo de vida (LCA) que cuantifique el impacto ambiental de la fabricación, instalación, operación y fin de vida de todos los componentes de la instalación, incluyendo la tubería de polietileno, el fluido caloportador y la bomba de calor. Este análisis permitiría obtener la huella de carbono completa de la instalación, comparar el tiempo de retorno energético y ambiental con el de otras alternativas renovables como la aerotermia, y reforzar la justificación medioambiental ante el IDAE en el marco de la convocatoria FEDER para la AGE [36].

La tercera línea es la integración con un sistema de monitorización energética. La instalación de un sistema de gestión y monitorización energética (BEMS) integrado con la bomba de calor, los fancoils y el captador permitiría registrar el rendimiento real de la instalación, detectar desviaciones respecto al diseño y optimizar la operación a lo largo del tiempo. Los datos obtenidos serían de gran valor para la calibración de modelos de simulación y para la justificación técnica de futuras inversiones en eficiencia

energética en el ámbito de la ENM, en cumplimiento de los objetivos de seguimiento y mejora continua establecidos por la Directiva AJEMA 2/2026 [10].

La cuarta línea es la hibridación con energía solar fotovoltaica. La instalación geotérmica propuesta consume aproximadamente 22.400 kWh eléctricos al año, la totalidad de los cuales se adquieren actualmente de la red. Una línea de trabajo de gran interés sería el estudio de la hibridación del sistema con una instalación de autoconsumo fotovoltaico sobre la cubierta plana del edificio Isaac Peral, cuya superficie de aproximadamente 1.200 m² ofrece un potencial de generación estimado de 90-120 MWh/año en las condiciones de irradiación de Marín. La complementariedad estacional entre la geotermia, con mayor consumo en invierno, y la fotovoltaica, con mayor generación en verano, es limitada, pero la generación en los meses de primavera y otoño podría cubrir una fracción relevante del consumo de la bomba de calor, reduciendo adicionalmente el coste de operación y las emisiones de CO₂. Este estudio debería evaluar el dimensionamiento óptimo de la instalación fotovoltaica, la necesidad de almacenamiento y la normativa de autoconsumo aplicable a instalaciones del Ministerio de Defensa.

La quinta línea es la optimización del control de la bomba de calor. El diseño desarrollado en este TFG adopta un COP constante de 4,8 para todos los meses del año. En la práctica, el COP varía en función de la temperatura del fluido del captador —que oscila entre 5 y 15 °C a lo largo del año— y de la temperatura de impulsión al circuito de fancoils, que puede modularse mediante una curva de calefacción en función de la temperatura exterior. Una línea de trabajo relevante sería el estudio de la estrategia de control óptima de las dos unidades de 20 kW en configuración cascada: cuándo operar con una sola unidad y cuándo con ambas, qué curva de calefacción maximiza el COP estacional, y cómo coordinar el arranque con las resistencias de apoyo para minimizar su uso. Esta optimización podría incrementar el COP estacional real entre un 5% y un 15% respecto al valor nominal adoptado, con el consiguiente impacto en el ahorro económico y en el período de retorno calculado.

La sexta línea es la comparativa con aerotermia como alternativa tecnológica. La aerotermia, bomba de calor aire-agua, es la alternativa más directamente comparable con la geotermia horizontal en términos de coste y aplicación en edificios existentes. Su principal ventaja es la ausencia de obra civil de excavación, lo que reduce significativamente el coste de instalación; su principal desventaja es que el COP disminuye precisamente en los días más fríos, cuando la demanda del edificio es mayor, al contrario que la geotermia cuyo foco frío permanece estable. Para el clima oceánico de Marín, con temperaturas invernales moderadas, la diferencia de rendimiento entre ambas tecnologías es menor que en climas continentales, lo que hace especialmente interesante esta comparativa. Un estudio que evaluase ambas alternativas en términos de coste de instalación, COP estacional real, consumo eléctrico anual y período de retorno proporcionaría a la ENM una base sólida para la toma de decisión de inversión.

La séptima línea es la evaluación del impacto sobre el terreno a largo plazo. El diseño verifica el cumplimiento del límite de extracción anual de 70 kWh/(m²·año) establecido por la VDI 4640 [7], que garantiza la sostenibilidad térmica del captador en condiciones normales de operación. Sin embargo, este límite se establece para condiciones medias y no evalúa el comportamiento del terreno ante escenarios extremos: varios inviernos consecutivos más fríos de lo normal, variaciones en el nivel freático por sequía prolongada, o degradación progresiva de las propiedades térmicas del suelo por extracción acumulada a lo largo de décadas. Una línea de trabajo de interés sería la modelización numérica del comportamiento térmico del subsuelo a largo plazo mediante software de simulación geotérmica como EED (Earth Energy Designer) o FEFLOW, que permitiría evaluar la evolución de la temperatura del terreno no perturbado a 10, 25 y 50 años de operación y confirmar que no se produce agotamiento térmico del captador en el horizonte de vida útil de la instalación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ATECYR (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración), «Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado», Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid, jun. 2012.
- [2] J. I. Rodríguez Fernández-Arroyo, «Aprovechamientos geotérmicos para bomba de calor — Volumen I». EnergyLab — Área de Edificios, Universidad de Vigo, Vigo, enero de 2012.
- [3] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)», Diario Oficial de la Unión Europea, Bruselas, abr. 2024. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=OJ:L_202401275
- [4] Gobierno de España — Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030 (PNIEC)», Secretaría de Estado de Energía — Ministerio MITERD, Madrid, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/planificacion/pniec.html>
- [5] Escuela Naval Militar (ENM), «Datos de consumo de gas natural del edificio Isaac Peral. Años 2018 y 2025-2026», Escuela Naval Militar — Departamento de Infraestructuras, Marín, Pontevedra, ene. 2026.
- [6] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), «Mapa Geológico de España MAGNA 1:50.000. Hoja 04-10 (185): Pontevedra». Madrid, 1981. [En línea]. Disponible en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>
- [7] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), «VDI 4640 — Parte 2: Thermal use of the underground. Ground source heat pump systems», VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001.
- [8] Ministerio de Defensa, «Directiva núm. 107/1997, de 2 de junio, sobre protección del medio ambiente en el ámbito del Departamento», Ministerio de Defensa, Madrid, Directiva ministerial 107/1997, 1997.
- [9] Secretaría de Estado de Defensa, «Instrucción 56/2011, de 3 de agosto, sobre sostenibilidad ambiental y eficiencia energética en el ámbito del Ministerio de Defensa», Ministerio de Defensa, Madrid, Instrucción 56/2011, 2011.
- [10] Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada, «Directiva AJEMA 2/2026 sobre medio ambiente y eficiencia energética en instalaciones de la Armada», Armada Española, Ministerio de Defensa, Madrid, Directiva interna 2/2026, 2026.
- [11] G. Rubiera Quesada, «Estudio de un sistema de climatización basado en bomba de calor hidrotérmica en el edificio Isaac Peral de la ENM», Trabajo Fin de Grado, Centro

- Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar — Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2016.
- [12] A. Sánchez-Ferragut Guitart, «Optimización energética del edificio Isaac Peral: simulación y propuestas de mejora», Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar — Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2019.
 - [13] E. Díaz del Río Oleaga, «Estudio de alternativas de climatización en el cuartel Francisco Moreno», Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar — Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2015.
 - [14] Á. De las Heras Gutiérrez de la Cámara, «Estudio de implantación de una bomba de calor geotérmica en el cuartel Almirante Francisco Moreno de la Escuela Naval Militar», Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar — Universidad de Vigo, Marín, Pontevedra, 2017.
 - [15] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), «Valores climatológicos normales: estación de Pontevedra / Marín — serie 1981-2010». Madrid, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>
 - [16] AENOR, «UNE-EN 12831-1:2017 — Sistemas de calefacción en edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño», Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2017.
 - [17] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, «Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas», Ministerio de Industria, Turismo y Comercio — Gobierno de España, Madrid, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027>
 - [18] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), «VDI 4640 — Parte 1: Thermal use of the underground. Fundamentals, approvals, environmental aspects», VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, dic. 2000.
 - [19] European Geothermal Energy Council (EGEC), «EGEC Geothermal Market Report 2024-2025», European Geothermal Energy Council (EGEC), Brussels, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report/>
 - [20] Red Eléctrica de España (REE), «Informe del sistema eléctrico español 2023», Red Eléctrica de España (REE / ENTSO-E), Madrid, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/publicaciones/informe-del-sistema-electrico-espanol/2023>
 - [21] Madrid Subterra, «Geotermia ibérica: asombroso potencial». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.madridsubterra.es/geotermia-iberica-asombroso-potencial/>
 - [22] Geotermia Online, «El IDAE registra en España más de 5 millones de bombas de calor instaladas con 37 GW de potencia». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://geotermiaonline.com/13905/idae-registra-en-espana-mas-de-5-millones-de-bombas-de-calor-instaladas-con-37-gw-de-potencia/>
 - [23] Selectra / PrecioGas, «Energía geotérmica: funcionamiento, ventajas y desventajas». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://preciogas.com/instalaciones/geotermia#geotermia-horizontal>
 - [24] Instalaciones Pintos S.L., «¿Se puede poner geotermia en una casa ya construida en Pontevedra?» 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://pintossl.es/blog/se-puede-poner-geotermia-en-una-casa-ya-construida-en-pontevedra/>
 - [25] Akiter Renovables, «Instalación de geotermia». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.akiter.com/instalacion-de-geotermia/>

- [26] International Energy Agency (IEA), «The Future of Heat Pumps», International Energy Agency (IEA), Paris, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
- [27] Geotermia Vertical, «Suelo radiante refrescante: qué es, cómo funciona y ventajas». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.geotermiavertical.es/suelo-radiante-refrescante/>
- [28] Geotermia Vertical, «¿Qué es un fan coil? Funcionamiento con bomba de calor geotérmica». 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.geotermiavertical.es/fan-coil/>
- [29] Energanova, «Geotermia con radiadores, ¿sí o no?» 2025. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://energanova.es/geotermia-con-radiadores-si-o-no/>
- [30] Google LLC, «Vista aérea del recinto de la Escuela Naval Militar de Marín». 2026. Accedido: 25 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://earth.google.com/web/@42.39680373,-8.70732315,2.82405854a,342.11256133d,35y,0h,0t,0r>
- [31] Enagás, «Poder calorífico superior del gas natural. Valores publicados para la red de distribución de la zona norte de España». Enagás, S.A., Madrid, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.enagas.es/es/gestion-tecnica-del-sistema/energia-en-el-sistema/calidades-del-gas/>
- [32] Waterkotte GmbH, «EcoTouch DS 5023.5 Ai. Bomba de calor geotérmica agua-agua. Ficha técnica y documentación de producto». Waterkotte GmbH, Herne, Alemania, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.waterkotte.eu/products/heat-pumps/geothermal-heat-pumps>
- [33] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), «Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España (actualización 2022)», MITERD — Gobierno de España, Madrid, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/Documento sReconocidos/>
- [34] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, «Informe de supervisión de los mercados minoristas de gas y electricidad 2024», CNMC, Madrid, IS/DE/027/25, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnmc.es/sites/default/files/6099794.pdf>
- [35] Eurostat, «Estadísticas de precios de electricidad y gas natural para consumidores no domésticos. España, primer semestre 2024». Oficina Europea de Estadística, 2024. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics
- [36] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Convocatoria de expresiones de interés. Plan de reducción del consumo energético en la Administración General del Estado. Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) 2021-2027», IDAE, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, Convocatoria BDNS IdBDNS 792592, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sede.idae.gob.es/tramites-servicios/convocatoria-de-expresiones-de-interes-plan-de-reduccion-del-consumo-energetico>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

El presente Trabajo Fin de Grado aborda el diseño de una instalación de climatización basada en energía geotérmica renovable para un edificio de uso académico de la Escuela Naval Militar. Por su propia naturaleza, el trabajo integra consideraciones de carácter social, económico y ambiental en el núcleo de su desarrollo técnico, no como elementos accesorios sino como motivación principal del estudio. A continuación, se identifican las secciones de la memoria donde se recogen estas consideraciones.

Implicaciones ambientales

La justificación ambiental del trabajo se desarrolla a lo largo de toda la memoria. En la introducción se contextualiza la instalación en el marco de los compromisos de neutralidad climática de la Unión Europea recogidos en la Directiva EPBD 2024/1275 [3] y el PNIEC 2023-2030 [4], que fijan objetivos concretos de reducción de emisiones en el sector de la edificación pública. Se menciona asimismo la Directiva AJEMA 2/2026 [10], que establece las líneas de actuación en materia de medio ambiente y eficiencia energética aplicables a las instalaciones de la Armada.

El impacto ambiental cuantificado de la instalación se recoge en el apartado 4.8, donde se calcula que la sustitución del sistema actual de caldera de gas natural por la instalación geotérmica propuesta reduciría las emisiones de CO₂ del edificio en 14.961 kg CO₂/año, equivalente a una reducción del 81,7% respecto a la situación actual, calculada a partir de los factores de emisión oficiales del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) [33] y de REE [20]. Esta reducción mejorará progresivamente en los próximos años conforme el mix eléctrico español incremente su proporción de energías renovables, tal como prevé el PNIEC 2023-2030.

Desde el punto de vista del impacto ambiental de la propia obra, la instalación del captador horizontal requiere la excavación de 34 zanjas de 60 m en la pista militar del recinto de la ENM. Este impacto es temporal y reversible: una vez ejecutada la instalación, la superficie se repone en su estado original y la pista puede volver a utilizarse con normalidad. El fluido caloportador empleado, monopropilenglicol al 25%, es un compuesto de baja toxicidad, biodegradable y autorizado para uso alimentario, que no representa un riesgo significativo para el suelo ni para las aguas subterráneas en caso de fuga. La tubería de polietileno PE-100 tiene una vida útil superior a 50 años y es reciclable al final de su vida útil.

Implicaciones económicas

Las implicaciones económicas de la instalación se desarrollan en el apartado 4.9 de la memoria. El coste total estimado de la instalación asciende a 136.628 € sin IVA, de los que el 40% corresponde a obra civil y el 37% a equipos y sistema de distribución interior. El ahorro económico anual calculado sobre el consumo real del edificio en 2025 es de 5.127 €/año, incluyendo tanto el ahorro en energía como la reducción de los costes de mantenimiento.

El análisis de sensibilidad muestra que la rentabilidad de la instalación es robusta frente a variaciones en los precios de la energía, siendo favorable en todos los escenarios de precios del gas superiores a 0,065 €/kWh. La tendencia estructural de encarecimiento de los combustibles fósiles por los costes del mercado de derechos de emisión ETS y el abaratamiento progresivo de la electricidad por la mayor penetración renovable favorecen la rentabilidad a largo plazo de la instalación.

Desde el punto de vista de la financiación pública, se identifica el Plan de reducción del consumo energético en la AGE con fondos FEDER 2021-2027 [36] como el mecanismo de financiación aplicable al Ministerio de Defensa, con una dotación de 391,7 millones de euros. Con una reducción de inversión

del 40% mediante este mecanismo y trabajando sobre el consumo real del edificio, el período de retorno se reduce a 16,0 años, compatible con la vida útil de la bomba de calor.

Más allá del análisis de retorno estrictamente financiero, la instalación elimina completamente la dependencia del edificio respecto al precio del gas natural, cuya volatilidad quedó patente durante la crisis energética de 2022, y estabiliza los costes de operación a largo plazo, lo que tiene un valor estratégico relevante para la gestión presupuestaria de un organismo público como es la Escuela Naval Militar.

Implicaciones sociales y de salud y seguridad

La instalación geotérmica propuesta tiene implicaciones sociales positivas en varios ámbitos. En el ámbito de la comunidad de la ENM, la mejora del sistema de climatización del edificio Isaac Peral beneficia directamente a los alumnos, profesores y personal que lo utilizan diariamente, mejorando las condiciones de confort térmico y eliminando los problemas derivados del envejecimiento del sistema actual. La incorporación de refrigeración activa, de la que el edificio carece actualmente, mejora adicionalmente las condiciones de trabajo durante los periodos lectivos de primavera y otoño.

En el ámbito institucional, la instalación contribuye al papel ejemplarizante de las Fuerzas Armadas en materia de eficiencia energética y sostenibilidad, coherente con los compromisos adquiridos en la Directiva 107/1997 del Ministerio de Defensa [8] y la Instrucción 56/2011 [9]. Una instalación pública de referencia en el ámbito de la geotermia en Galicia tiene además un valor de demostración tecnológica para otros organismos públicos de la región.

Desde el punto de vista de la salud y seguridad, la instalación geotérmica elimina los riesgos asociados a la combustión de gas natural en el interior del edificio: riesgo de fuga de gas, riesgo de intoxicación por monóxido de carbono y riesgo de incendio o explosión asociados a la instalación de gas. La bomba de calor opera con electricidad y un fluido caloportador no inflamable y de baja toxicidad, lo que simplifica los requisitos de seguridad de la sala de máquinas y reduce la carga de mantenimiento preventivo obligatorio asociado a las instalaciones de gas.

En el ámbito de la seguridad energética, la eliminación de la dependencia del gas natural reduce la exposición de la ENM a interrupciones de suministro, cuyo impacto sobre el funcionamiento de un centro de formación militar podría tener consecuencias operativas significativas. La instalación geotérmica, al depender únicamente de la electricidad y del calor almacenado en el subsuelo, ofrece una mayor garantía de continuidad de suministro en situaciones de crisis energética.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En cumplimiento del Sello Internacional de Calidad EUR-ACE y con el fin de trabajar el sub-resultado de aprendizaje relativo a la responsabilidad ética del ingeniero, el presente anexo recoge las reflexiones éticas derivadas del desarrollo del Trabajo Fin de Grado, atendiendo a las dimensiones de honestidad intelectual, responsabilidad medioambiental, impacto social y uso de la información.

Honestidad intelectual y rigor técnico

El presente trabajo se apoya en datos reales facilitados por la Escuela Naval Militar de Marín, en particular los consumos de gas natural del edificio Isaac Peral correspondientes a los años 2018 y 2025 [5], y en los valores de transmitancia térmica de la envolvente obtenidos y verificados por estudios previos [12]. En ningún caso se han modificado, ajustado o seleccionado estos datos con el fin de obtener resultados más favorables para la instalación propuesta. Las limitaciones del método de cálculo empleado, en particular la ausencia de un Test de Respuesta Térmica y el uso del método simplificado de grados-día en lugar de simulación dinámica, se reconocen explícitamente en los apartados 3.4.6 y 4.9, y se cuantifica su impacto potencial sobre los resultados.

Del mismo modo, el análisis económico presenta los resultados de forma honesta, incluyendo el período de retorno sin reducción de inversión, que es elevado, junto con los escenarios con financiación pública. No se ocultan ni minimizan los resultados desfavorables, ya que una decisión de inversión responsable por parte de la ENM requiere disponer de toda la información, incluida la menos favorable.

Responsabilidad medioambiental

Desde el punto de vista ético, la elección de una instalación geotérmica como objeto de estudio responde a la convicción de que los ingenieros tienen una responsabilidad activa en la transición energética y en la reducción del impacto ambiental de las infraestructuras que diseñan. El edificio Isaac Peral consume actualmente gas natural, un combustible fósil cuya combustión emite CO₂ y contribuye al cambio climático. La instalación propuesta reduciría estas emisiones en un 81,7%, una contribución concreta y cuantificable a los objetivos de descarbonización.

Se ha prestado especial atención a los posibles impactos negativos de la propia instalación sobre el medio ambiente. El fluido caloportador seleccionado, monopropilenglicol al 25%, es biodegradable y de baja toxicidad, minimizando el riesgo de contaminación del suelo en caso de fuga. La extracción de calor del subsuelo se ha dimensionado dentro de los límites de sostenibilidad establecidos por la norma VDI 4640 [7], garantizando que la temperatura del terreno no se degrade de forma irreversible a lo largo de la vida útil de la instalación. Estos criterios no son simplemente requisitos normativos: responden a la obligación ética del ingeniero de no comprometer la disponibilidad del recurso geotérmico para generaciones futuras.

Impacto sobre las personas

La instalación propuesta tiene un impacto directo sobre las personas que utilizan el edificio Isaac Peral: los alumnos de la ENM en formación como futuros oficiales de la Armada, el personal docente y el personal de servicio. La mejora de las condiciones de confort térmico en un edificio que actualmente carece de refrigeración activa tiene un efecto positivo sobre el bienestar, la concentración y el rendimiento académico de sus ocupantes, aspectos que el ingeniero debe considerar más allá de los indicadores puramente energéticos o económicos.

Desde una perspectiva más amplia, el presente trabajo forma parte de un conjunto de estudios realizados en el Centro Universitario de la Defensa de Marín sobre la eficiencia energética de las instalaciones de la ENM. Cada uno de estos estudios contribuye a construir un cuerpo de conocimiento que puede influir en decisiones de inversión reales con impacto sobre el bienestar de la comunidad naval y sobre el uso de los recursos públicos. Esta responsabilidad refuerza la obligación de rigor y honestidad intelectual mencionada en el primer apartado de este anexo.

Uso de la información y confidencialidad

Los datos de consumo energético facilitados por la Escuela Naval Militar tienen carácter interno y han sido utilizados exclusivamente con fines académicos en el marco del presente TFG. No se han divulgado datos de carácter operativo, estratégico o de seguridad de las instalaciones de la ENM. La Directiva AJEMA 2/2026 [10], citada en la memoria como marco institucional de referencia en materia de eficiencia energética, es un documento de uso interno de la Armada cuyo contenido no ha sido reproducido en este trabajo, limitándose su mención a su existencia y alcance general.

En relación con las referencias bibliográficas, se han citado y atribuido correctamente todas las fuentes utilizadas, incluyendo los trabajos previos realizados sobre el mismo edificio por otros alumnos del CUD [11], [12], [13], [14]. El uso de los datos y resultados de estos trabajos se ha realizado de forma transparente, indicando en cada caso el origen de los valores adoptados y las diferencias metodológicas respecto al presente estudio.

Reflexión final

La ingeniería no es una actividad éticamente neutra. Cada decisión de diseño tiene consecuencias sobre las personas, el medio ambiente y el uso de los recursos colectivos. El presente trabajo ha intentado integrar estas consideraciones no como un requisito formal sino como parte del proceso de toma de decisiones técnicas, reconociendo que el mejor diseño no es siempre el que optimiza un único parámetro sino el que alcanza un equilibrio razonado entre eficiencia técnica, viabilidad económica, responsabilidad ambiental y bienestar de las personas a las que sirve.

ANEXO III: FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA DE CALOR

Modelo seleccionado (Tabla A3-1): Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai Fabricante: Waterkotte GmbH, Herne (Alemania). Configuración de la instalación: 2 unidades en paralelo.

Parámetro	Valor
Tipo	Bomba de calor geotérmica agua-agua reversible
Potencia de calefacción nominal (W10/W35)	~23 kW
Potencia de calefacción mínima (modulación)	~5 kW
COP calefacción (W10/W35, EN 14511)	~4,8
COP calefacción (W0/W35, EN 14511)	~4,2
Potencia de refrigeración (W15/W18, refrigeración pasiva)	~20 kW
Potencia eléctrica absorbida (W10/W35)	~4,8 kW
Refrigerante	R410A
Tecnología de compresor	Scroll hermético, velocidad variable (Inverter)
Temperatura máxima de impulsión	65 °C
Temperatura mínima fluido captador	-5 °C
Caudal nominal circuito captador	~3,0 m³/h
Caudal nominal circuito calefacción	~3,5 m³/h
Conexiones hidráulicas	1 1/4"
Resistencia eléctrica de apoyo integrada	5 kW
Dimensiones (Al × An × Pr)	1.060 × 600 × 650 mm
Peso	~130 kg
Nivel sonoro	< 42 dB(A)
Alimentación eléctrica	400 V / 3N~ / 50 Hz
Potencia eléctrica máxima	~6,5 kW
Marcado CE	Sí
Normativa de referencia	EN 14511, EN 14825

Tabla A3-1 Características técnicas de la bomba de calor Waterkotte EcoTouch DS 5023.5 Ai. (Tomado de: Waterkotte GmbH [32]. Los valores corresponden a las condiciones de ensayo normalizadas W10/W35 según EN 14511)