



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de implantación de una bomba de calor geotérmica en el cuartel Almirante Francisco Moreno de la Escuela Naval Militar*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Álvaro de las Heras Gutiérrez de la Cámara

**DIRECTORES:** Miguel Ángel Gómez Rodríguez  
Arturo González Gil

**CURSO ACADÉMICO:** 2016-2017

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de implantación de una bomba de calor geotérmica en el cuartel Almirante Francisco Moreno de la Escuela Naval Militar*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

El cuartel “*Almirante Francisco Moreno*” de la Escuela Naval Militar, es un edificio que alberga a más de 300 futuros oficiales de la Armada Española. Actualmente, emplea un sistema mixto de calefacción y producción de ACS (agua caliente sanitaria) mediante calderas de gas natural, que provoca un gran coste y un enorme impacto medioambiental. Por todo lo dicho anteriormente, este sistema supone un gran problema, ya que los recursos naturales y energéticos se están agotando. Por tanto surge la necesidad de invertir en el campo de las energías renovables, ya que son prácticamente gratuitas y no perjudican al medioambiente. El objetivo del presente trabajo es estudiar la sustitución del sistema actual, por una instalación de climatización y producción de ACS cuya fuente de energía sea el subsuelo, mediante el empleo de una bomba de calor geotérmica, tratando de dimensionar y seleccionar correctamente cada uno de los componentes de la instalación, haciendo uso de la normativa vigente. Para ello se ha realizado un estudio de los diferentes tipos de instalaciones geotérmicas existentes, seleccionando posteriormente la que más se adecúe a las características del edificio en estudio. Finalmente, se incluye un estudio, en el que se compara el gasto económico de ambos sistemas, así como el impacto medioambiental que genera cada uno de ellos.

## **PALABRAS CLAVE**

Bomba de calor, calefacción, instalación, medioambiente, agua caliente sanitaria (ACS)



# **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer el continuo apoyo de mi familia, compañeros y amigos durante estos 5 años de formación.

A mi tutor, sin su ayuda, la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A Silvia y Coki, mis padres, los pilares de mi vida, mi ejemplo a seguir.



## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Contenido .....  | 1  |
| Índice de Figuras .....  | 3  |
| Índice de Tablas.....  | 5  |
| 1 Introducción y objetivos .....                                   | 6  |
| 1.1 Introducción .....   | 6  |
| 1.1.1 Bombas de calor .....  | 7  |
| 1.1.2 Clasificación de las bombas de calor.....                    | 9  |
| 1.2 Objetivos .....  | 11 |
| 1.3 Metodología .....  | 12 |
| 2 Estado del arte .....  | 13 |
| 2.1 Introducción .....   | 13 |
| 2.1.1 Situación de la geotermia en España .....                    | 14 |
| 2.2 Tipos de yacimientos geotérmicos .....                         | 15 |
| 2.2.1 Yacimiento geotérmico de alta entalpía.....                  | 15 |
| 2.2.2 Yacimiento geotérmico de mediana entalpía.....               | 15 |
| 2.2.3 Yacimiento geotérmico de baja entalpía.....                  | 15 |
| 2.2.4 Yacimiento geotérmico de muy baja entalpía.....              | 16 |
| 2.3 Instalación geotérmica .....                                   | 16 |
| 2.3.1 Tipos de captación geotérmica .....                          | 17 |
| 2.3.2 Bomba de calor .....   | 20 |
| 2.3.3 Tipos de circuito interior .....                             | 22 |
| 3 Desarrollo del TFG.....  | 26 |
| 3.1 Edificio.....  | 26 |
| 3.1.1 Generalidades .....  | 26 |
| 3.1.2 Climatización .....  | 28 |
| 3.1.3 Consumos .....   | 29 |
| 3.1.4 Análisis del terreno.....                                    | 31 |
| 3.2 Elección y dimensionamiento de la instalación geotérmica ..... | 35 |
| 3.2.1 Circuito de captación exterior.....                          | 35 |
| 3.2.2 Bomba de calor .....   | 44 |
| 3.2.3 Circuito de distribución interior.....                       | 47 |
| 3.2.4 Acumuladores de ACS .....                                    | 54 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.5 Esquema de la instalación.....                        | 54 |
| 4 Impacto económico y medioambiental.....                   | 56 |
| 4.1 Presupuestos e impacto económico.....                   | 56 |
| 4.1.1 Instalación geotérmica .....                          | 56 |
| 4.1.2 Suelo radiante .....                                  | 57 |
| 4.1.3 Presupuesto general .....                             | 58 |
| 4.1.4 Tiempo de retorno de la inversión inicial .....       | 58 |
| 4.2 Impacto medioambiental.....                             | 60 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                       | 62 |
| 5.1 Conclusiones .....                                      | 62 |
| 5.2 Líneas futuras .....                                    | 63 |
| 6 Bibliografía.....   | 64 |
| Anexo I: Mapa geológico de la zona.....                     | 66 |
| Anexo II: Plano plantas a climatizar .....                  | 67 |
| Anexo III: Certificado AENOR materiales suelo radiante..... | 69 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 Empleo de las distintas fuentes de energía .....   | 6  |
| Figura 1-2 Ciclo de Carnot .....  | 8  |
| Figura 1-3 Diagrama Presión-Entalpía .....  | 9  |
| Figura 1-4 Comparación bombas de calor ( [7] ) .....  | 11 |
| Figura 2-1 Potencias geotérmicas instaladas en Europa ( [12] ) .....  | 14 |
| Figura 2-2 Influencia de la radiación solar sobre la temperatura del subsuelo ( [6] ) .....                     | 16 |
| Figura 2-3 Circuitos de la instalación geotérmica ( [12] ) .....  | 17 |
| Figura 2-4 Circuito captación horizontal ( [13] ) .....   | 18 |
| Figura 2-5 Captadores slinky y espiral ( [6] ) .....  | 18 |
| Figura 2-6 Captadores verticales en U ( [2] ) .....   | 19 |
| Figura 2-7 Tubos coaxiales ( [2] ) .....  | 19 |
| Figura 2-8 Circuito de captación vertical ( [13] ) .....  | 19 |
| Figura 2-9 Circuito de captación abierto ( [13] ) .....   | 20 |
| Figura 2-10 Ciclo efectuado por las bombas de calor .....   | 21 |
| Figura 2-11 Fancoil ( [1] ) .....   | 22 |
| Figura 2-12 Radiador de agua caliente ( [17] ) .....  | 23 |
| Figura 2-13 Comparación suelo radiante con radiadores ( [17] ) .....  | 24 |
| Figura 2-14 Distribución espiral y doble serpentín ( [17] ) .....   | 24 |
| Figura 3-1 Cuartel Almirante Francisco Moreno (Proporcionado por la Escuela Naval Militar)....                  | 26 |
| Figura 3-2 Planta baja “Almirante Francisco Moreno” (Proporcionado por la Escuela Naval Militar)                | 27 |
| .....   |    |
| Figura 3-3 Plano de la primera y segunda planta del edificio (Proporcionado por la Escuela Naval Militar) ..... | 28 |
| Figura 3-4 Demnda anual de ACS y Calefacción entre los años 2013 y 2016 .....                                   | 30 |
| Figura 3-5 Esquema Test de Respuesta Geotérmico ( [6] ) .....   | 32 |
| Figura 3-6 Gráfico temperatura ( [6] ) .....  | 33 |
| Figura 3-7 Parte del MAGNA en la que se encuentra el edificio ( [18] ) .....                                    | 34 |
| Figura 3-8 Conductividad térmica para diferentes materiales ( [10] ) .....                                      | 35 |
| Figura 3-9 Extracción de calor específica posibles para intercambiadores verticales ( [10] ) .....              | 36 |
| Figura 3-10 Monograma para diseño intercambiadores verticales ( [10] ) .....                                    | 37 |
| Figura 3-11 Vista aérea de las perforaciones a realizar (SIEMENS NX) .....                                      | 39 |
| Figura 3-12 Profundidad de las perforaciones (SIEMENS NX) .....   | 39 |
| Figura 3-13 Imagen aérea “Almirante Francisco Moreno” (Google Maps) .....                                       | 40 |
| Figura 3-14 Tubo de doble “U” ( [13] ) .....  | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-15 Propiedades de los materiales de relleno para sondeos ( [6]).....         | 42 |
| Figura 3-16 Diagrama sistema de captación. ( [12]) .....                              | 43 |
| Figura 3-17 Bomba de calor geotérmica DS6500 ( [24]).....                             | 45 |
| Figura 3-18 Ficha técnica bomba de calor geotérmica seleccionada ( [24]).....         | 46 |
| Figura 3-19 Ciclo para el refrigerante 407C ( [2]) .....                              | 47 |
| Figura 3-20 Distribución de calor de los distintos tipos de calefacción ( [17]) ..... | 48 |
| Figura 3-21 Componentes suelo radiante ( [13]).....                                   | 48 |
| Figura 3-22 Banda perimetral ( [17]) .....  | 49 |
| Figura 3-23 Panel de aislamiento ( [17]).....   | 50 |
| Figura 3-24 Sistema de colectores de dos salidas ( [17]) .....                        | 52 |
| Figura 3-25 Cabezal electrónico ( [17]) .....   | 52 |
| Figura 3-26 Termostato T23 ( [17]) .....  | 53 |
| Figura 3-27 Depósito de inercia seleccionado ( [27]) .....                            | 54 |
| Figura 3-28 Esquema instalación final .....   | 55 |
| Figura 4-1 Evolución costes totales de cada instalación .....                         | 60 |
| Figura 4-2 Comparativa de emisiones de CO <sub>2</sub> .....                          | 61 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1-1 Tipo de bombas de calor .....                           | 10 |
| Tabla 3-1 Superficie por zonas .....                              | 27 |
| Tabla 3-2 Emisiones CO <sub>2</sub> ( [8]).....                   | 29 |
| Tabla 3-3 Demanda anual ( [8]) .....                              | 29 |
| Tabla 3-4 Demanda ACS a 60 °C ( [9]) .....                        | 31 |
| Tabla 3-5 Longitud perforaciones .....                            | 38 |
| Tabla 3-6 Propiedades propilenglicol ( [2]) .....                 | 41 |
| Tabla 3-7 Conductividad térmica distintos materiales ( [26])..... | 50 |
| Tabla 4-1 Presupuesto instalación geotérmica .....                | 56 |
| Tabla 4-2 Presupuesto suelo radiante .....                        | 57 |
| Tabla 4-3.....  | 59 |
| Tabla 4-4 Factor de emisiones según tipo de combustible.....      | 60 |

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

Nos encontramos en una época de cambio climático, sin embargo, la sociedad actual exige un gran consumo energético para mantener un nivel de vida adecuado. Es por ello que surge la necesidad de buscar y desarrollar nuevas alternativas que sean sostenibles, manteniendo el nivel de actividad y progreso, pero que se ajuste a los recursos disponibles, evitando así el derroche energético.

Aspectos como el crecimiento económico, procesos de industrialización y el incremento de la demanda energética de los países en desarrollo, provocarán que la demanda energética mundial pueda aumentar hasta en un 57% en los próximos años [1].

Actualmente, el carbón, el petróleo y el gas natural son las tres fuentes de combustibles fósiles de las que se depende principalmente para cubrir las necesidades energéticas, ya sea para el calentamiento de hogares como para suministrar electricidad o el combustible necesario a coches y otros medios de transporte. Pero estas fuentes de energía no son inagotables, y con el ritmo actual de crecimiento de su consumo, se estima que en unos 200 años estos recursos podrían llegar a agotarse [2]. Junto con la energía nuclear, todavía suponen el 99% de las fuentes de energía de todo el planeta, por tanto, de forma global, sólo en un 1% se estarían cubriendo las necesidades energéticas gracias a las energías renovables, aunque se estima, que en el año 2040, este porcentaje aumente a un valor de aproximadamente el 5% [3].



Figura 1-1 Empleo de las distintas fuentes de energía

Otro de los problemas más importantes que está causando este crecimiento de la demanda energética, es el impacto medioambiental que estos combustibles generan. Durante su combustión, se emite a la atmósfera dióxido de carbono, que es el gas que contribuye principalmente al calentamiento global. Por ello, el uso de los combustibles fósiles está considerado como la principal causa de la liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Además, se estima que aproximadamente el 80% del aumento de las emisiones en los próximos 20 años sea causado por los países más desarrollados [1].

Todavía no se han podido encontrar soluciones lo suficientemente convincentes como para solventar el impacto medioambiental que las energías fósiles generan, de ahí la necesidad invertir en el desarrollo del empleo de las energías renovables, como son la hidráulica, la solar o la geotérmica, que apenas generan impacto al medioambiente.

En este trabajo, se estudiará el empleo de energías renovables en el ámbito de la edificación, en concreto en la climatización y producción de ACS para edificios, ya que este sector representa un alto porcentaje del consumo total de energía. En los últimos años, la Unión Europea está mostrando un gran interés por reducir el consumo de energía en los edificios y hacer que este sea más eficiente, y aquí es donde cobran gran importancia las bombas de calor, ya que según el Heat Pump Centre de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), provocan una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en un 6%, y podría llegar a ser hasta un 16%, ya que utilizan una fuente de energía renovable e inagotable [1].

Normalmente, empleando una bomba de calor en modo calefacción, por cada kWh de trabajo que realiza el compresor, se aportan 4,5 kWh de calor, de los cuales 3,5 kWh provienen de fuentes de energía naturales “gratuitas” (terreno, aire...), por lo que presenta una gran ventaja si se compara con el sistema convencional de caldera de gas natural, con la que hay que pagar los 4,5 kWh térmicos de combustible frente al kWh eléctrico que se paga empleando una bomba de calor [2], por ello, el empleo de una bomba de calor, no solo supondrá una disminución del impacto medioambiental, sino que también supondrá un importante ahorro económico.

Además, las bombas de calor, no solo se pueden emplear como calefacción o producción de ACS, sino que también se pueden emplear para refrigeración, como se explicará en el 2.3.2, opción que no disponible en instalaciones que funcionen con energías fósiles.

A continuación, para poder entender el motivo por el que se ha seleccionado la bomba de calor geotérmica para instalación propuesta en este trabajo, se dará una breve explicación del funcionamiento principal de una bomba de calor, y posteriormente se realizará una comparativa entre los diferentes tipos de bombas de calor existentes.

### *1.1.1 Bombas de calor*

Las bombas de calor son básicamente una máquina termodinámica que se basan en el principio de la máquina de Carnot, mostrado en la Figura 1-2; Sadi Carnot estudió un ciclo termodinámico ideal reversible operando entre dos focos, uno caliente y otro frío, absorbiendo una cantidad de calor de la fuente de alta temperatura, cediendo calor a la de baja temperatura y produciendo un trabajo sobre el exterior. Pero la máquina de Carnot es teórica, en la realidad no es un ciclo perfecto y su rendimiento dependerá de la relación entre el calor cedido y el consumo del compresor en el caso de calefacción, y el calor extraído del foco frío y el consumo del compresor en el caso de refrigeración.

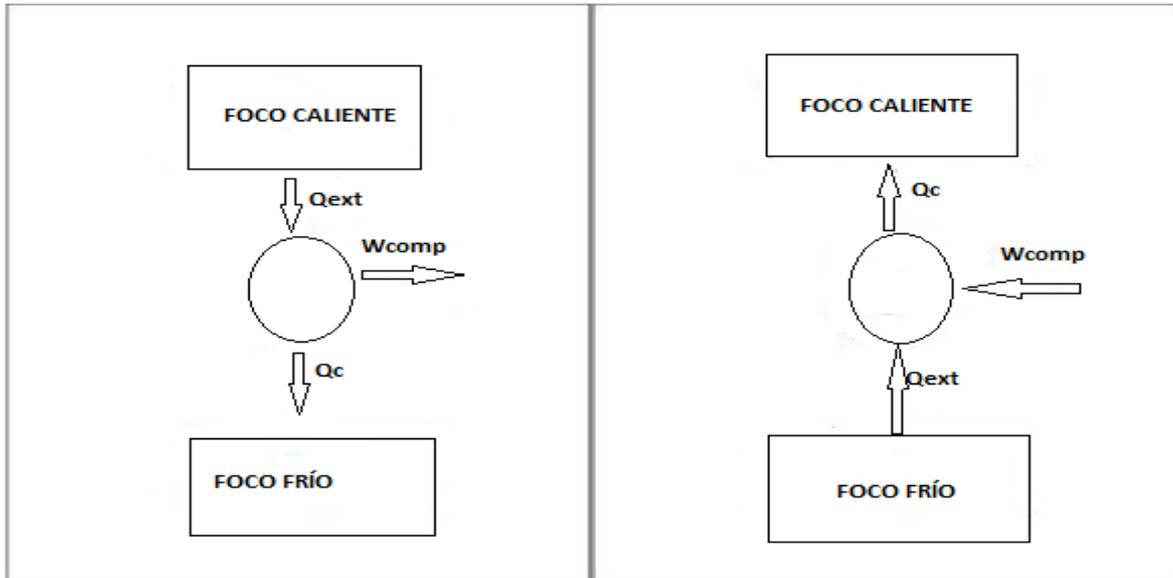


Figura 1-2 Ciclo de Carnot

Este rendimiento mencionado se denomina COP (Coefficient of Performance) en caso de calefacción y EER (Efficiency Energy Rate) en caso de refrigeración. La mayor parte de este calor se toma de fuentes de energías renovables. La suma de este calor extraído y el consumido por el compresor, es el calor total cedido al medio, como se muestra en la Ecuación 1-1 [4].

$$Q_c = Q_{ext} + W_{comp}$$

**Ecuación 1-1**

$Q_c$ : calor total cedido (kW).

$Q_{ext}$ : calor extraído (kW).

$W_{comp}$ : trabajo consumido por el compresor (kW)

Por lo que se define el rendimiento de la bomba de calor trabajando en modo calefacción como [4]:

$$COP = \frac{Q_c}{W_{comp}}$$

**Ecuación 1-2**

Y en el caso que trabaje en modo refrigeración se definiría como [4]:

$$EER = \frac{Q_{ext}}{W_{com}}$$

**Ecuación 1-3**

Con esto se puede observar que el rendimiento sólo depende de la temperatura del foco frío o del foco caliente, por lo que se puede deducir lo siguiente [4]:

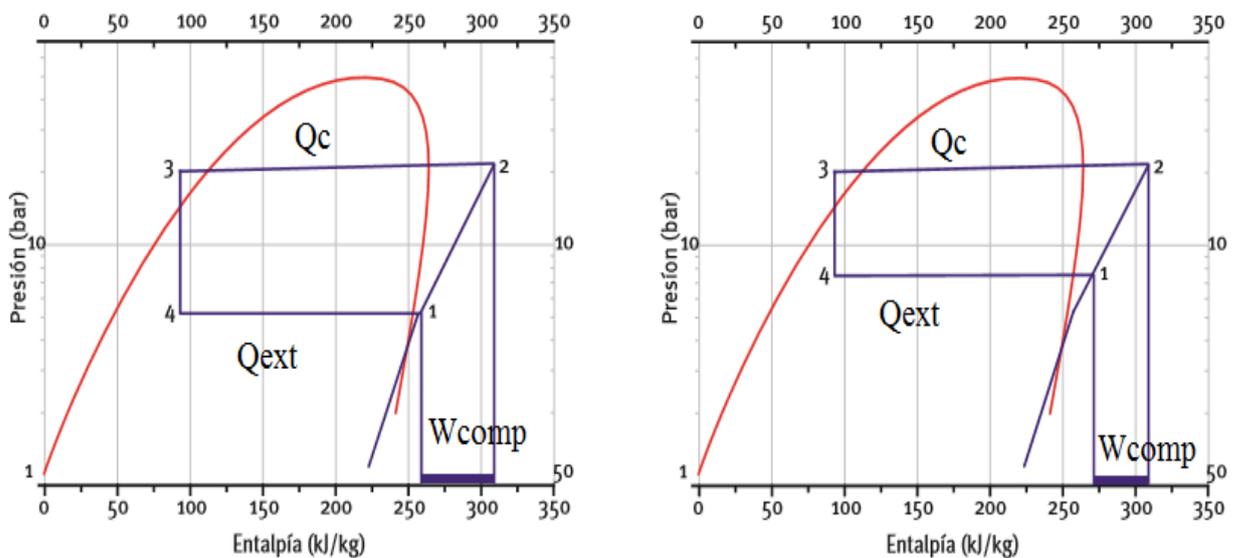
$$COP = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

**Ecuación 1-4**

$$EER = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

**Ecuación 1-5**

Mediante estas fórmulas, podemos deducir que cuanto menor sea la diferencia de temperatura entre el foco frío y el foco caliente, mayor será el rendimiento de la bomba de calor, esto es fundamental para la elección óptima de la bomba de calor según la zona geográfica en la que se tenga que instalar. En el diagrama de Molliere mostrado en la Figura 1-3, que es básicamente el ciclo que sigue una bomba de calor, se puede observar que a menor diferencia de presión y temperatura entre el evaporador (4-1) y el condensador (3-2), menor trabajo se requiere del compresor, por lo que el COP aumenta [4].



**Figura 1-3 Diagrama Presión-Entalpía**

La disposición y explicación de los distintos componentes de una bomba de calor se explican en el apartado 2.3.2.

### *1.1.2 Clasificación de las bombas de calor*

Para la clasificación de las bombas de calor existen diferentes maneras de realizarla, aunque para el ámbito de la climatización, la manera óptima de clasificarlas, es en función del medio que emplean para la obtención de energía y del medio al que se le ceda dicha energía.

| Medio de obtención de energía | Medio al que se cede energía |
|-------------------------------|------------------------------|
| AIRE                          | AIRE                         |
| AIRE                          | AGUA                         |
| AGUA                          | AIRE                         |
| AGUA                          | AGUA                         |
| TIERRA                        | AGUA                         |

**Tabla 1-1 Tipo de bombas de calor**

Las bombas de calor aire-aire, aire-agua y agua-aire, son las que se conocen como bombas de calor convencionales, ya que son las más empleadas actualmente en el ámbito de la climatización para edificios, mientras que las bombas de calor agua-agua y tierra-agua (también conocida como agua-agua, como se explica en el apartado 2.3.2), son denominadas como bombas de calor geotérmicas, que actualmente no son muy empleadas en España por los motivos explicados en el apartado 2.1.1.

Las bombas de calor convencionales obtienen la energía del aire exterior o del agua de lagos o ríos, lo que en ocasiones, supone una gran desventaja, ya que su funcionamiento se ve muy afectado por las condiciones meteorológicas. Al producirse fuertes descensos de temperaturas en invierno, el rendimiento de la bomba de calor se verá afectado, como se demostrará en el siguiente apartado, además, si la temperatura exterior descendiera por debajo de los 0 °C, se podría llegar a producir una fina de capa de hielo o escarcha en la unidad exterior de la bomba de calor, lo que disminuiría el rendimiento de la bomba [1]. Por otro lado, las bombas de calor geotérmicas obtienen la energía del subsuelo o de aguas subterráneas, lo que supone una gran ventaja, ya que su temperatura permanece constante durante prácticamente todo el año debido a que el medio de extracción de energía no se ve afectado por las condiciones meteorológicas. Además, el agua tiene una mayor capacidad de transporte de calor que el aire, y se transporta de manera muy eficiente empleando bombas de circulación. Por otra parte, las instalaciones que emplean una bomba de calor geotérmica, son mucho menos ruidosas y robustas que las convencionales [2]. El funcionamiento de los distintos tipos de bombas de calor geotérmicas de explican con detalle en el apartado 2.3.2.

#### **1.1.2.1 Comparación bomba de calor geotérmica con bomba de calor convencional**

Durante el mes de invierno, la temperatura exterior del aire en Pontevedra suele estar por debajo de los 10 °C, y la temperatura que se pretende alcanzar en el interior de aproximadamente 20 °C [5], lo que supone un incremento de 11 °C si se emplease una bomba de calor convencional aire-aire, esto se traduce en un gran gasto energético, y una pérdida de rendimiento, tal y como demuestra la Ecuación 1-4 y la gráfica de la Figura 1-3, por el contrario, las bombas de calor geotérmicas, trabajan con temperaturas del subsuelo, que como se ha dicho, tiene una temperatura constante durante todo el año, generalmente comprendida entre 12 y 17 °C [6] en España, por lo que, para alcanzar los 20 °C de temperatura en el interior del lugar a climatizar, se requiere de un menor salto de temperaturas, lo que se traduce en una mayor eficiencia de la bomba geotérmica en comparación con la bomba de calor convencional. En la Figura 1-4, se muestra un gráfico, en el que se puede observar la diferencia de temperaturas entre medio de extracción o cesión de calor de cada bomba de calor.

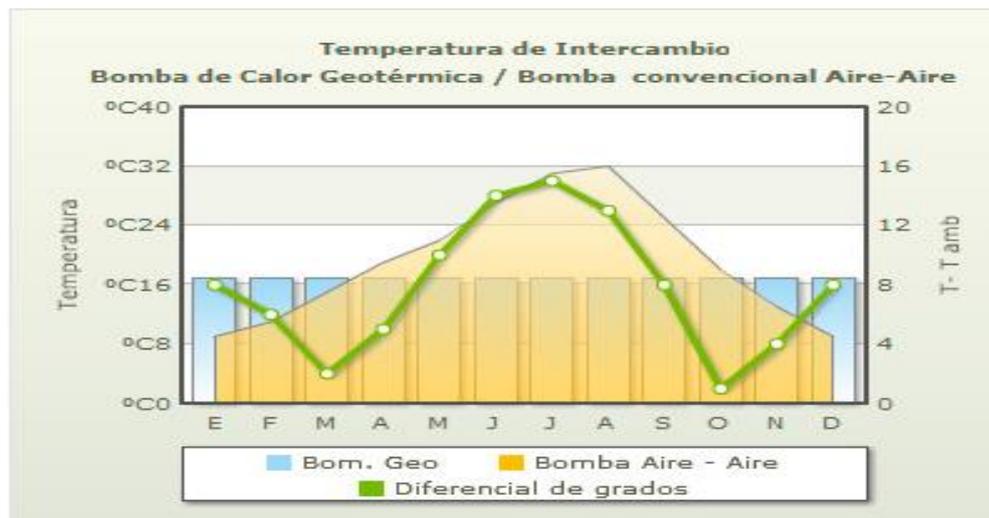


Figura 1-4 Comparación bombas de calor ( [7] )

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es conseguir reducir el impacto medioambiental y el gasto económico que genera el sistema convencional de gas natural de climatización y producción de ACS, que actualmente emplea el cuartel “Almirante Francisco Moreno” de la Escuela Naval Militar, realizando un estudio sobre la posibilidad de sustituir este sistema, por una bomba de calor geotérmica, cuya fuente de energía es el calor almacenado en el subsuelo. Para ello, se marcan los siguientes objetivos específicos:

- Conocer la situación actual de la geotermia en España en comparación con el resto de Europa, y los ámbitos de empleo de la energía geotérmica.
- Comprender el funcionamiento de una bomba de calor y de los distintos tipos de instalaciones de climatización y producción de ACS cuya fuente de energía sea la energía geotérmica, así como el funcionamiento del sistema de climatización con el que cuenta actualmente el cuartel “Almirante Francisco Moreno”.
- Conocer los distintos métodos disponibles para poder llevar a cabo un análisis del terreno de donde se pretende extraer el calor necesario para climatizar el cuartel “Almirante Francisco Moreno”, y seleccionar el que se considere oportuno.
- Saber seleccionar con criterio el tipo de sistema de captación geotérmico más adecuado para el cuartel “Almirante Francisco Moreno”.
- Comprender los distintos métodos de dimensionamiento del sistema de captación geotérmico, y emplear el más adecuado para dimensionar el sistema de captación seleccionado, además de saber seleccionar adecuadamente en lugar donde se situará el sistema de captación.
- Realizar una correcta selección de los materiales necesarios para el sistema de captación seleccionado, justificando en todo momento el motivo por el que se selecciona cada uno de ellos y explicar su función.
- Seleccionar correctamente la bomba de calor geotérmica necesaria para que satisfaga la demanda de calefacción y producción de ACS del “Almirante Francisco Moreno”, y que sea compatible con el sistema de captación geotérmico seleccionado.
- Estudiar si el circuito de distribución de calor interior es válido para la instalación geotérmica seleccionada, de lo contrario, se propondrá otra opción que sea válida, y se realizará de manera aproximada un dimensionamiento y una estimación de los materiales necesarios para llevar a cabo su instalación.

- Estudiar si los depósitos de inercia y de agua potable existentes son válidos para la instalación seleccionada, de lo contrario, se dimensionarán unos nuevos para que cumplan con los requisitos necesarios.
- Mostrar un esquema simplificado de la instalación final, para comprender de forma más visual su funcionamiento.
- Realizar un estudio comparativo sobre el impacto medioambiental que supone la instalación geotérmica propuesta en el trabajo, en comparación con la ya existente, así como realizar una estimación sobre el tiempo que tendrá que pasar para que la instalación sea económicamente rentable.

Como objetivo secundario, con este trabajo se tratará de:

- Concienciar al mundo sobre la importancia del empleo de energías renovables en lugar de las energías fósiles en el ámbito de la climatización para edificios, e intentar hacer ver las ventajas de la geotermia, para incrementar su uso en España.

### 1.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos mencionados en el apartado anterior, se seguirán los siguientes métodos:

- Se realizará un estado del arte en el que se conocerá la situación actual de la geotermia en España con respecto a Europa y los diferentes tipos de instalaciones geotérmicas existentes y su funcionamiento.
- La instalación se dimensionará teniendo en cuenta las dimensiones del edificio obtenidas con ayuda de los planos del edificio en AUTOCAD, y la demanda anual del edificio, en donde se compararán los datos obtenidos en un trabajo realizado por un alumno en el año 2015, sobre la demanda anual del “*Almirante Francisco Moreno*” [8], y la demanda media real de los últimos 4 años proporcionada por la Escuela Naval Militar, y se seleccionará la más propicia de manera justificada. Para obtener la máxima demanda de ACS se seguirán las indicaciones de la de la sección HE 4 del Documento Básico de Ahorro de Energía [9].
- Para el análisis del terreno se explicará el Test de Respuesta Geotérmico y los mapas MAGNA, proporcionados por el Instituto Geológico y Minero de España, y se aplicará el que sea posible.
- El tipo circuito de captación se seleccionará en función de las características del terreno y del edificio, y se dimensionará teniendo en cuenta la normativa alemana VDI-4640 [10] o el método propuesto por “*La American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHARE)*” [11], y para la selección de los materiales y disposición de ellos se tendrán en cuenta los requisitos de la norma VDI-4640 [10].
- Utilizando el programa de simulación SIEMENS NX, se representará gráficamente la disposición del circuito de captación geotérmico con respecto al edificio.
- Se estudiarán diferentes catálogos de bombas de calor geotérmicas de gran potencia, para elegir la que más se adecúe a las necesidades del edificio y de la instalación seleccionada.
- La dimensión y elección de materiales del circuito de distribución de calor interior se realizará aplicando la norma UNE-EN 1264 [10].
- Se calculará un presupuesto aproximado de la nueva instalación, consultando a distintas empresas por el precio de los materiales y mano de obra, para poder calcular el tiempo de retorno de esta inversión inicial.
- Para el estudio comparativo del impacto medioambiental, se realizará en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> que generen las fuentes de energía de cada una de las instalaciones a comparar.
- Al final de trabajo se redactará un apartado sobre las conclusiones sacadas del trabajo realizado, así como una serie de propuestas para futuros trabajos.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

En la actualidad, la energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovables más desconocida, como se ha dicho anteriormente, es obtenida bajo la superficie de la tierra en forma de calor. Hasta ahora, su uso se ha limitado a zonas en las cuales las condiciones geológicas permiten un transporte (de agua en estado líquido o gaseoso) para transferir el calor desde zonas calientes profundas hasta las proximidades de la superficie de la tierra, dando lugar a los recursos geotérmicos. En España, fue muy estudiada durante los años ochenta, con el objeto de aplicarla en instalaciones de climatización. Sin embargo, por varios motivos, principalmente económicos, estos estudios no siguieron adelante. Cabe mencionar que la energía geotérmica no solo es usada para la producción de climatización, sino que también es empleada para la producción de electricidad, aunque en menor medida.

La tecnología de climatización por captación geotérmica se aplica desde hace más de 20 años en todo el mundo y es una de las más utilizadas en los países del norte de Europa y Francia, donde el número de instalaciones geotérmicas crece sustancialmente año tras año, de hecho, la Comisión Europea cifró el número de bombas de calor geotérmicas instaladas en Europa en 600.000 unidades a principios de 2007, dando una potencia total de 7329 MW. A nivel mundial, se cifró en aproximadamente un millón de unidades instaladas dando una potencia de unos 12000 MW [2]. No obstante, a pesar de ser una tecnología muy consolidada a nivel europeo, en España la bomba de calor geotérmica todavía no tiene gran uso, a pesar de darse unas condiciones más favorables para su uso que en muchos países del norte de Europa. En la Figura 2-1 se puede observar la gran diferencia de instalaciones geotérmicas que hay en toda Europa con respecto a España.

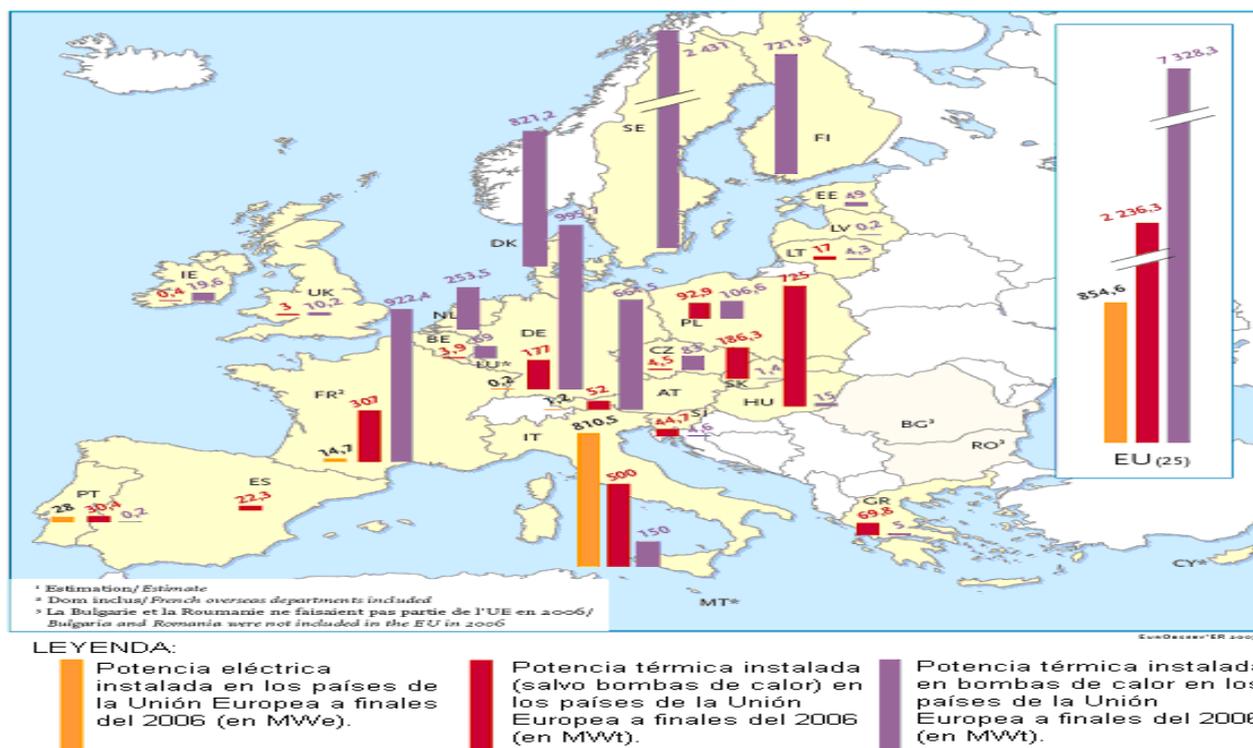


Figura 2-1 Potencias geotérmicas instaladas en Europa ( [12])

### 2.1.1 Situación de la geotermia en España

Como ya se ha mencionado, la geotermia no es un sistema que esté muy desarrollado en España, de hecho, según el Ministerio de Industria, la energía geotérmica solo supone el 0,01% de la energía total primaria instalada en España.

Estos datos son impactantes, dado que las condiciones que posee el suelo español para almacenar e intercambiar calor son mejores que la mayoría de países en donde ya hay un gran número de instalaciones geotérmica implantadas. España recibe una radiación solar de aproximadamente 15 MJ/m<sup>2</sup> diarios [13], que calienta la superficie del suelo, que en grandes zonas de España se encuentra libre de vegetación, con elevada temperatura ambiental y con escasas precipitaciones, lo cual favorece que el almacenamiento del calor solar sea mayor que en muchos países europeos. Los principales motivos a los que se achaca el escaso empleo de este tipo de instalaciones se podrían reducir a los siguientes:

1. Falta de promoción, la inmensa demanda de las bombas de calor geotérmica por parte de muchos países europeos, ha provocado que los principales fabricantes no hayan tenido capacidad de exportación a España hasta hace apenas 10 años.
2. Poco interés, generalmente por las empresas inmobiliarias, ya que este tipo de instalaciones suponen un coste inicial mayor que otras alternativas, además, España actualmente no cuenta con una normativa propia que regule el diseño de las instalaciones geotérmicas, por lo que normalmente se hace uso de la normativa alemana VDI 4640 [10].
3. Falta de apoyo, La Administración Central ya está empezando a hacer que el uso de paneles solares para la producción de agua caliente sanitaria sea obligatorio en la construcción de nuevos edificios, sin embargo, no se ha tenido en cuenta la energía geotérmica, aunque cabe destacar, que cada vez son más las comunidades autónomas que subvencionan parte de los costes para la instalación de bombas de calor geotérmicas [12].

## 2.2 Tipos de yacimientos geotérmicos

Los tipos de yacimientos geotérmicos se clasifican teniendo en cuenta diferentes criterios, pero principalmente están clasificados según la entalpía de los fluidos geotermales que hacen de medio de transporte desde las rocas situadas en la profundidad hasta la superficie. La existencia de estos fluidos es fundamental, ya que sino no sería posible explotar los recursos del yacimiento geotérmico, a menudo, si no se dispone de este fluido en forma natural, se emplea uno artificial.

Según la entalpía de los fluidos, cuyo término se emplea para expresar el calor que contienen dichos fluidos y se considera proporcional a la temperatura, los yacimientos geotérmicos se dividen en muy baja, baja, media y alta entalpía, los cuáles se explicarán a continuación.

### 2.2.1 Yacimiento geotérmico de alta entalpía

Son yacimientos cuyos fluidos se encuentran a una temperatura aproximada entre 150 °C y 400 °C [12], y se aprovecha para generar principalmente energía eléctrica, y en menor proporción para proporcionar agua caliente sanitaria.

Este tipo de yacimientos se suelen situar en zonas con gran actividad volcánica, y situadas en los bordes de las placas litosféricas. Las profundidades en las que se suelen explotar estos yacimientos se sitúan entre 500 y 1500 m. [2]

La producción de electricidad se realiza mediante ciclos de turbinas de vapor, el vapor que se aprovecha proviene de los acuíferos evaporados en las rocas a elevada temperatura. Para aprovechar estos recursos en yacimientos de baja permeabilidad, habitualmente es necesario crear un depósito artificial a grandes profundidades donde se encuentre la roca caliente, lugar donde se realiza el intercambio energético haciendo pasar un fluido desde la superficie, el cual regresa a gran temperatura, o por medio de perforaciones según técnicas casi idénticas a las de la extracción del petróleo [7].

Cabe destacar que estos recursos se encuentran en zonas muy concretas de la tierra, por lo que no se pueden aprovechar en la mayor parte de países del mundo.

### 2.2.2 Yacimiento geotérmico de mediana entalpía

En este tipo de yacimientos, los fluidos suelen a temperaturas comprendidas entre 90 y 150 °C, [2] y al igual que los yacimientos de alta entalpía, sus recursos también pueden ser empleados para la producción de energía eléctrica en la que el agua o el vapor transmite el calor a otro fluido que acciona la turbina, sin embargo, el rendimiento se reduce con respecto a los yacimientos de alta entalpía. Por ello, estos yacimientos se emplean mayormente para proporcionar calefacción y refrigeración, para esta última habría que hacer uso de la máquina de absorción.

También es necesario la creación de un acuífero artificial para el aprovechamiento de sus recursos, y también se encuentra en zonas muy concretas del planeta con grandes discontinuidades y fallas.

### 2.2.3 Yacimiento geotérmico de baja entalpía

Este tipo de yacimientos están mucho más disponibles que los anteriormente citados, habitualmente se encuentran en cuencas sedimentarias, donde los fluidos geotermales se encuentran a temperaturas comprendidas entre los 50 y 90 °C y a profundidades entre los 1500 y 3000 m [2], con un gradiente térmico de unos 3 °C por cada 100 m de profundidad, pudiendo alcanzar a 2000 m una temperatura de 70 °C. Otro requisito para su explotación es que posea formaciones geológicas que permitan el paso del fluido encargado de extraer el calor de las rocas. Este calor suele estar destinado a baños, piscinas termales, calefacción, invernaderos, etc.

### 2.2.4 Yacimiento geotérmico de muy baja entalpía

Este tipo de yacimientos, a diferencia de los anteriores, sí que están disponibles en prácticamente todo el mapa terrestre. Como se verá a continuación, los yacimientos de muy baja entalpía son posibles de explotar gracias a la gran inercia térmica de la tierra comparada con la del aire, ya que la temperatura se mantiene a una temperatura relativamente estable independientemente de las condiciones climatológicas del exterior. Sus recursos son empleados para obtener calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria en edificios, y el medio más empleado es la bomba de calor geotérmica. A continuación, se verán los tipos de instalaciones geotérmicas más empleadas actualmente para el aprovechamiento de los recursos que ofrecen los yacimientos de muy baja entalpía.

## 2.3 Instalación geotérmica

La instalación geotérmica es la encargada de obtener el calor proveniente del subsuelo de muy baja entalpía, que tras una serie de etapas lo utiliza para climatizar el edificio, así como para la obtención de agua caliente sanitaria.

El fundamento principal de este tipo de instalaciones de climatización es la gran inercia térmica del subsuelo y de las aguas subterráneas por la cual la tierra es capaz de almacenar el calor acumulado en la corteza terrestre por los rayos del sol e incluso mantenerlo estacionalmente. Se sabe que las variaciones diarias de la temperatura ambiente no influyen en gran medida, mientras que las variaciones estacionales pueden influir entre los 5 y los 20 primeros metros de profundidad, como se muestra en la Figura 2-2. En el caso de España, a una profundidad superior a los 20 metros, la temperatura del suelo, independientemente de la estación del año o las condiciones meteorológicas, es de alrededor de 12-17 °C [14]. Además de esta estabilidad térmica, otro aspecto de gran importancia es el efecto de la variación de temperatura con la profundidad, conocido como gradiente térmico, siendo su valor normal alrededor de 3 °C por cada 100 m de profundidad [15]. Además, la utilización de instalaciones geotérmicas para climatización de edificios puede reducir el consumo de energía entre un 30% y un 40% en comparación con los sistemas clásicos ya conocidos [6].

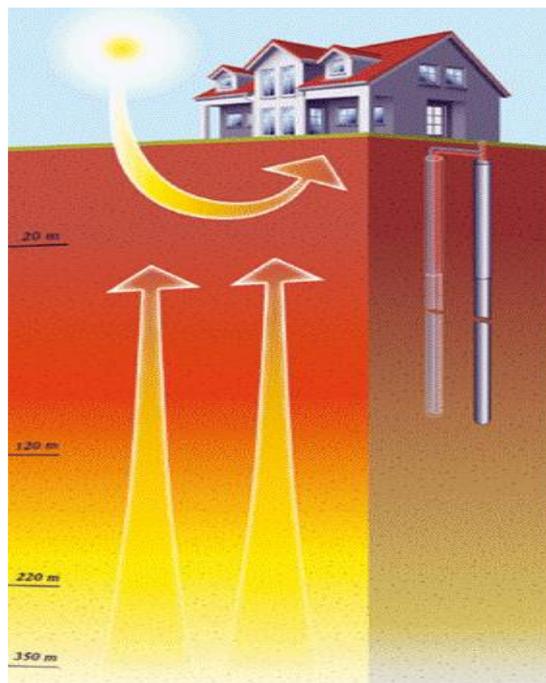


Figura 2-2 Influencia de la radiación solar sobre la temperatura del subsuelo ( [6])

La obtención de la energía acumulada en el subsuelo se realiza mediante captadores geotérmicos, que son los tubos de un intercambiador de entre 1,5 a 11 cm de diámetro que se encuentra enterrado en el subsuelo, por los que circula un fluido anticongelante [6]. Este fluido absorbe o cede calor al terreno,

y lo lleva hasta una bomba de calor, que utilizando la mínima electricidad necesaria, transforma este calor en energía útil para la climatización y obtención de agua caliente sanitaria.

Todo este proceso consta de tres partes bien diferenciadas:

1. Circuito exterior (captadores), encargados de realizar el intercambio de calor con el subsuelo. Existen diferentes tipos de captación que se explicarán más adelante.
2. Bomba de calor geotérmica, encargada de transformar el calor obtenido por los captadores en energía para la climatización del edificio. Existen diferentes tipos de bombas geotérmicas, dependiendo del medio de donde se obtenga el calor y del medio donde se ceda este, como ya se comentó brevemente en la introducción, y se explicarán más en detalle posteriormente.
3. Circuito interior, encargado de la distribución de calor en todo el edificio. También existen diferentes alternativas para la elección del circuito interior que se explicarán posteriormente.

En la Figura 2-3 se muestra gráficamente como sería una instalación geotérmica con sus distintos elementos.

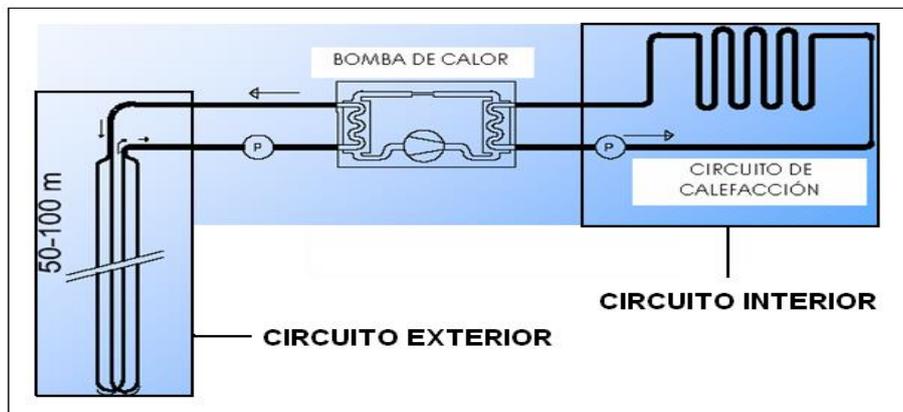


Figura 2-3 Circuitos de la instalación geotérmica ([12])

### 2.3.1 Tipos de captación geotérmica

Para realizar el intercambio de calor con el subsuelo actualmente se dispone de tres tipos de sistemas de captación, el sistema de captación de intercambio horizontal, de intercambio vertical y circuitos de captación abiertos, estos últimos realizan la captación con aguas subterráneas, de lagunas, etc.

#### 2.3.1.1 Sistema de captación horizontal

Este tipo de captadores, habitualmente se encuentran enterrados a escasa profundidad, aproximadamente entre 60 cm y 1.2 m bajo tierra [2]. Son sistemas sencillos de instalar por lo que son muy comunes para su uso en viviendas unifamiliares. La principal desventaja de este sistema es la gran extensión de terreno necesaria para su instalación, y que este debe ser alrededor de 2 veces la superficie a climatizar [16], además, no se puede construir nada encima de los captadores enterrados, ya que la radiación solar es el principal mecanismo para renovar la temperatura del terreno. Aproximadamente, mediante cálculos realizados se sabe que se recupera en torno a 39 W por m<sup>2</sup> de terreno y de 10 a 15 W por metro de tubo enterrado [2]. Estos tubos suelen estar hechos de polipropileno reticulado, polietileno rígido o de baja intensidad.

A pesar de su sencilla instalación y su asequible coste de obra, este sistema es menos eficiente que el resto, por el hecho de que los captadores se encuentran a escasa profundidad y se ven más afectados por la climatología de la zona. En la Figura 2-4 se muestra un esquema de cómo irían instalados los captadores horizontales.

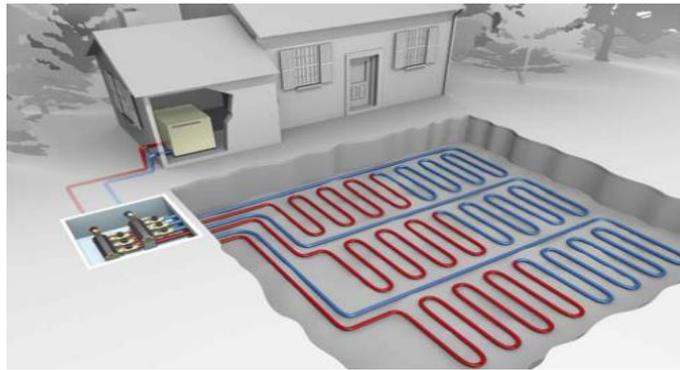


Figura 2-4 Circuito captación horizontal ( [13])

En el caso de que se disponga de menos terreno y queramos obtener la misma cantidad de calor, se han desarrollado unos intercambiadores de calor especiales con los que se ahorra más espacio, como son los captadores tipo “slinky” o en espiral, tal y como se muestra en la Figura 2-5.

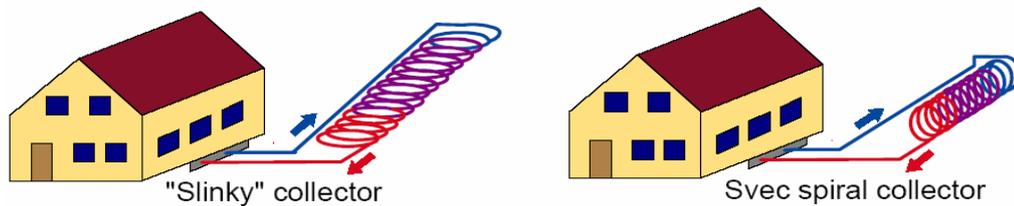


Figura 2-5 Captadores slinky y espiral ( [6])

### 2.3.1.2 Sistema de captación vertical

En este tipo de sistemas, los colectores suelen alcanzar profundidades entre 50 m y 150 m. Gracias a esto, se asegura una mayor estabilidad en la temperatura al no verse afectado por las condiciones externas, ya que, como se ha dicho anteriormente, a partir de los 20 m de profundidad la temperatura permanece prácticamente constante, aumenta unos 3 °C por cada 100 m. Este sistema presenta una mayor eficiencia que el sistema de captación horizontal, se estima que se recuperan en torno a 50 W por metro de sondeo. Para el sondeo, se realizan perforaciones verticales, en las que se introducen los tubos colectores. Normalmente, para mejorar la transmisión de calor a los colectores y aumentar la consistencia, la perforación se rellena con grava o bentonitas. Económicamente hablando, este tipo de sistema de captación es ligeramente más caro que el anterior debido a que las sondas geotérmicas son más caras que la de los horizontales, aun así, en todas sus variantes, es el sistema más recomendado [2].

Los captadores más utilizados son los tubos en U, como los mostrados en la Figura 2-6, es decir, durante el sondeo, cuando el tubo llega a la profundidad deseada, realiza un giro de 180° para volver a la superficie. Sus salidas conectan con el circuito de las bombas de calor geotérmicas.

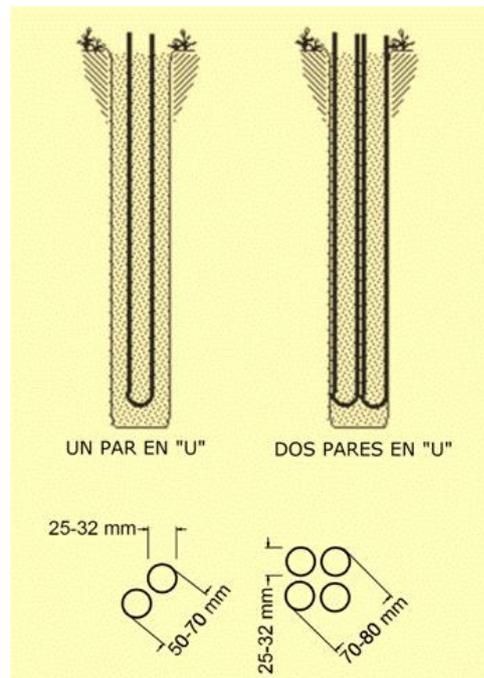


Figura 2-6 Captadores verticales en U ([2])

Otro tipo de captadores verticales son los tubos coaxiales, aunque son menos utilizados que los tubos en U. Su funcionamiento consiste en hacer que el fluido pase por la tubería central a la ida, y que a la vuelta pase por las tuberías exteriores, como se muestra en la Figura 2-7.

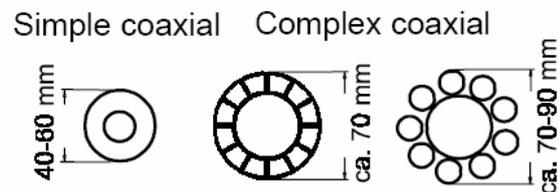


Figura 2-7 Tubos coaxiales ([2])

El número de perforaciones a realizar dependerá de la longitud de sondeo que se calcule, cuanto mayor sea la energía requerida por el edificio, mayor será esta longitud. En la Figura 2-8 se muestra el esquema más empleado en este tipo de sistemas.

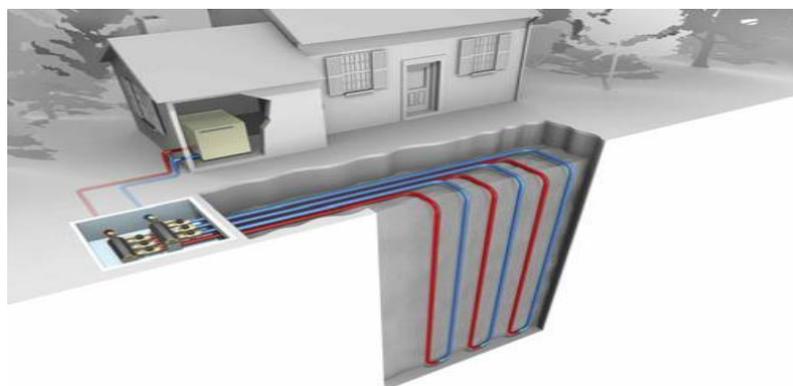


Figura 2-8 Circuito de captación vertical ([13])

### 2.3.1.3 Sistema de captación abierto

En este tipo de sistemas de captación, el fluido que se utiliza es el agua del subsuelo, cuya temperatura se mantiene constante durante todo el año. Por ello es fundamental que en el lugar de la instalación exista un acuífero o corriente subterránea, de esta manera, en lugar de recircular el fluido en un circuito cerrado, el agua del subsuelo se devuelve, por lo que económicamente es la opción más recomendable.

El bombeo del agua se realiza mediante un sondeo o pozo, que permite que la energía de esta sea aprovechada y garantice el correcto funcionamiento de la bomba de calor geotérmica. Por lo general, se necesitan dos pozos, uno de extracción y otro de inyección, como se muestra en la Figura 2-9, además, un requisito fundamental es que el agua del subsuelo sea de buena calidad, para evitar daños como la corrosión en las tuberías.



Figura 2-9 Circuito de captación abierto ( [13])

### 2.3.2 Bomba de calor

Como ya se mencionó en la introducción de este trabajo, las bombas de calor son las encargadas de obtener el calor obtenido a través de una fuente de energía renovable, y cederlo a otro medio, este proceso es reversible, es decir, en invierno se emplea en modo calefacción, donde el calor absorbido es cedido al lugar a climatizar deseado, mientras que en verano, el calor absorbido se extrae del lugar a refrigerar, y se cede al medio externo. Para llevar a cabo este proceso, la bomba de calor cuenta con los siguientes componentes [1]:

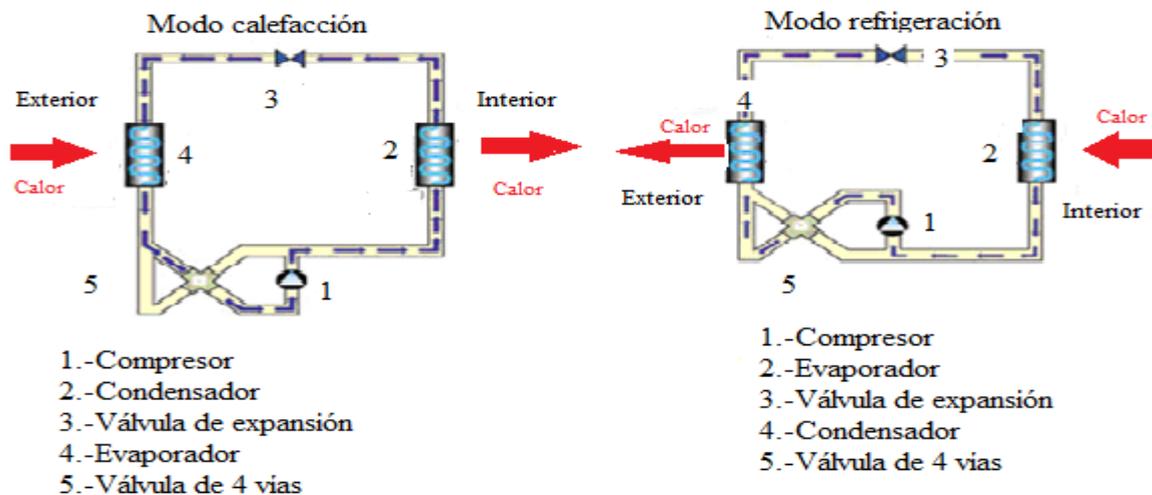
**Compresor**, elemento mecánico que comprime el gas (mediante el consumo de energía eléctrica), procedente de evaporador aumentando su presión hasta que se facilita el paso de gas a líquido en el condensador.

**Condensador**, es un intercambiador de calor donde el refrigerante procedente del compresor en estado de vapor, se condensa a una temperatura mayor que la del medio al cual se le va a ceder el calor, de esta forma se puede realizar el correcto intercambio de calor.

**Válvula de expansión**, donde el refrigerante disminuye su presión al expansionarse, además regula el flujo del refrigerante hacia el evaporador.

**Evaporador**, donde el refrigerante se evapora a una temperatura menor que la del medio de donde se extrae el calor, de esta forma se podrá realizar correctamente el intercambio de calor.

Como se ha dicho anteriormente, la bomba de calor puede ser reversible, para ello hay un elemento adicional en el caso de que, por ejemplo, queramos utilizarla como calefacción en invierno o como aire acondicionado en verano. Esto es la válvula de 4 vías, que básicamente es capaz de invertir el sentido de flujo de calor pudiendo impulsar el calor en cualquier dirección. En la Figura 2-10 se muestra el ciclo que sigue una bomba de calor en ambos modos de funcionamiento.



**Figura 2-10 Ciclo efectuado por las bombas de calor**

Además de poder utilizarse en modo refrigeración y modo calefacción, también se pueden emplear para la producción de agua caliente sanitaria, esto se suele realizar empleando una válvula de tres vías que permita emplear el agua calentada por la bomba de calor para ambos usos, sin embargo, para la instalación propuesta en este trabajo tiene alguna peculiaridad, y esto se realizará tal y como se muestra en la Figura 3-28.

Las bombas de calor que se pueden encontrar en una instalación geotérmica son las bombas de calor agua-agua o tierra-agua, las cuáles se explicarán es los siguientes subapartados.

### 2.3.2.1 GEOTÉRMICA AGUA-AGUA

En este tipo de bombas de calor, la forma de obtener energía se realiza transfiriendo agua (subterránea) a otro circuito de agua que está a mayor temperatura, calentando el ambiente deseado de forma indirecta, normalmente mediante fancoils, suelo radiante, etc. Sin embargo, el agua debe volver a su lugar de enfriamiento. De ahí, uno de los principales inconvenientes, el hecho de la necesidad de disponer de dos pozos, bien separados entre ellos, uno para la obtención del agua, y otro para el retorno de esta. Otro aspecto a tener en cuenta es la necesidad de disponer de grandes masas de agua, que estén a la temperatura requerida durante todo el año, en la zona donde se va a instalar la bomba [1]. Este tipo de bombas de calor son empleadas en instalaciones geotérmicas en donde el circuito de captación es un sistema abierto, como el explicado en el apartado 2.3.1.3.

### 2.3.2.2 GEOTÉRMICA TIERRA-AGUA

Se trata de una bomba cuyo funcionamiento se basa en la de la anterior, pero en este caso la fuente fría es el subsuelo. Su principal ventaja es el hecho de que la temperatura permanece prácticamente constante debido a su gran inercia térmica. El calor es absorbido por medio de unos captadores enterrados en el subsuelo, por los que circula un fluido anticongelante, normalmente agua glicol, por lo que estas bombas de calor también se suelen denominar agua-agua al igual que las anteriores. Este calor obtenido puede ser utilizado tanto como para la producción de agua caliente sanitaria como para la climatización de un edificio. Estas bombas evitan el problema de formación de escarcha mencionado anteriormente, como ocurre en las bombas convencionales, al no verse afectado por las condiciones atmosféricas, además, al obtener calor de un medio menos frío que las bombas de calor convencionales en invierno, su rendimiento mejora, y lo mismo pasa en verano para el caso de refrigeración, es más fácil ceder calor al terreno en verano que a la atmósfera [12]. Este tipo de bombas, son las más empleadas en

instalaciones geotérmicas donde el circuito de captación utiliza sondas verticales y horizontales como las explicadas en el apartado 2.3.1.

### 2.3.2.3 Fluidos refrigerantes

El fluido refrigerante en la bomba de calor juega un papel fundamental, ya que es el encargado de transportar el calor entre los circuitos interior y el exterior, sin embargo, su selección es complicada debido a que muchos de ellos son muy contaminantes y perjudiciales para el medioambiente, además, las temperaturas de trabajo del evaporador y condensador, también dependerán de la temperatura máxima y mínima a la que pueda llegar cada refrigerante.

Los refrigerantes suelen estar clasificados en naturales y artificiales. Entre los naturales figuran refrigerantes como el amoníaco (R-717), propano y butano (R-290 y R-600a), o el agua (R-718). Los artificiales se dividen en tres grupos [2]:

1. CFCs, cloro fluoro carbonos como el R-502, actualmente prohibidos por su alto nivel de contaminación, provocan efectos muy dañinos a la capa de ozono y generan gases del efecto invernadero.
2. HCFCs, hidro cloro fluoro carbonos, los cuales sustituyeron a los anteriores al ser menos perjudiciales para el medioambiente, pero su uso se acabó prohibiendo.
3. HFCs, hidro fluoro carbonos, al no contener cloro, no provocan efectos dañinos en la capa de ozono, sin embargo, sí que generan gases del efecto invernadero, aunque en mucha menor medida. Ejemplos de este tipo de refrigerantes son el R-134a, el R-407c y el R-410a. Estos refrigerantes nacen de la prohibición ya comentada de todos los refrigerantes con contenido de cloro, y son los más utilizados en la actualidad.

### 2.3.3 Tipos de circuito interior

Como ya se ha mencionado, el circuito interior es el encargado de distribuir por el interior del edificio el agua ya generada a la temperatura adecuada por la bomba de calor para climatizar el edificio y para la producción de agua caliente sanitaria. El intercambiador de calor de la bomba, calienta el agua del circuito cerrado de calefacción, que a su vez, empleando otro intercambiador de calor, calienta el agua de los depósitos acumuladores de ACS.

Existen varias formas de distribución interior que se explicarán a continuación.

#### 2.3.3.1 Fancoil

Se trata de un sistema formado por varios intercambiadores de calor de tubos aleteados, ventiladores, filtro de aire y un armazón, el intercambio de calor se produce a través de una batería por la que circula el agua caliente. Es un sistema de baja inercia térmica que calienta por convección, pero al contrario que el sistema de radiadores, donde la convección se hace de forma natural, aquí es de forma forzada.

Su principal inconveniente es la cantidad de ruidos que este genera, y la necesidad de instalar un sistema de regulación que hace que suba el precio de la obra [16]. En la Figura 2-11 se muestra un ejemplo de fancoil.



Figura 2-11 Fancoil ([1])

### 2.3.3.2 Radiadores de agua caliente

Actualmente es el más utilizado por la gran mayoría de edificios. Su funcionamiento se basa en hacer circular el agua caliente por el interior del propio radiador, normalmente de aluminio, y hueco por el interior con forma de serpentín, situado en la zona a climatizar, a la cual cede el calor. Esto se realiza generando una corriente natural para que una vez calentado el aire frío, este, ya caliente ascienda por diferencia de densidades distribuyéndose por el interior del edificio, esto se denomina convección natural. Esto tiene la desventaja de que hasta que el calor se distribuya por completo, la parte de arriba de la zona climatizada está más caliente que la inferior, lo que es un inconveniente para el óptimo confort del usuario, y además genera pérdidas de calor a través del techo, lo que se traduce en un mayor gasto energético.

En este tipo de sistemas, la temperatura de salida del agua al salir de la caldera se encuentra entre 70 y 80 °C, lo que puede implicar, que la bomba de calor a seleccionar deba utilizar un refrigerante específico que permita elevarse a esta temperatura, de lo contrario, el rendimiento se puede ver muy afectado, o incluso podrían no ser compatibles con este sistema de distribución de calor [2]. En la Figura 2-12 se muestra un radiador de agua caliente convencional.



**Figura 2-12 Radiador de agua caliente ( [17])**

### 2.3.3.3 Suelo radiante

Este método de distribución interior se basa en calentar el suelo del interior de edificio mediante resistencias eléctricas o mediante una red de tubos de polietileno reticulado o polibutileno, que van situados debajo del suelo del edificio y de una capa de mortero autonivelante por los cuales circula el agua caliente.

La principal ventaja con respecto a los radiadores es que la temperatura de salida necesaria para calentar el interior del edificio ronda los 40-50 °C, mientras que los radiadores necesitan una temperatura de unos 70 °C [12]. Además, al distribuirse el calor por el suelo, se obtiene un gradiente de temperaturas más favorable que con el sistema de radiadores, ya que, en el interior de un edificio, la parte inferior es la que requiere una mayor necesidad térmica, y no sucede como en otro tipo de sistemas de calefacción donde se calienta primero la parte superior, lo que puede provocar pérdidas a través del techo, por lo que con el sistema de suelo radiante se obtienen importantes ahorros energéticos. En la Figura 2-13 se muestra una comparación de la forma de distribución del aire caliente dentro de la habitación a climatizar entre este tipo de sistemas con el de radiadores.

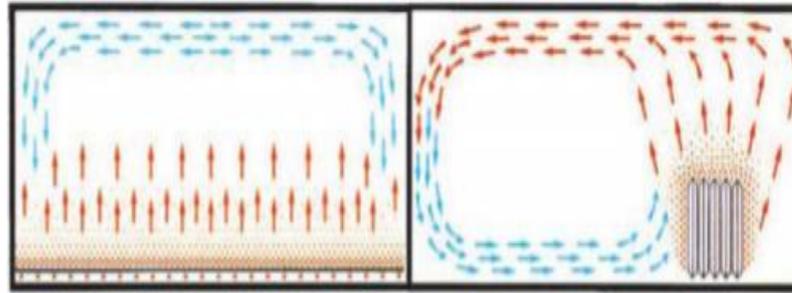


Figura 2-13 Comparación suelo radiante con radiadores ( [17])

Los tubos encargados de distribuir el calor por toda la superficie, pueden ir dispuestos de diferentes maneras, dependiendo principalmente de la geometría del edificio. Los tres más comunes son los siguientes:

- Distribución en serpentin: en este tipo de disposición, los tubos se distribuyen de extremo a extremo del edificio en líneas paralelas y con la misma separación entre ellas. La principal desventaja de este tipo de disposición, es que la distribución del calor no es exactamente uniforme, ya que el agua que circula por las tuberías se va enfriando a medida que el agua avanza por el circuito una vez sale del acumulador. Por otra parte, los tubos utilizados han de ser muy flexibles ya que este tipo de distribución requiere radios de curvatura muy pequeños.
- Distribución en doble serpentin: es muy similar al anterior, con la diferencia de que, entre las líneas paralelas, se deja un espacio en el cual se sitúan las tuberías de retorno del agua, lo que implica que la distribución de calor es mucho más uniforme, además se adapta a todo tipo de geometrías.
- Distribución en espiral: se trata de una variación de la distribución de doble serpentin, pero en lugar de disponer las tuberías paralelas entre ellas de extremo a extremo, se disponen realizando una espiral comenzando por un extremo, de fuera hacia dentro, y se deja un espacio al igual que en la de doble serpentin para colocar las tuberías de retorno. Se adapta adecuadamente a cualquier tipo de geometría, y el reparto de calor es también uniforme.

En la Figura 2-14, se muestra la disposición de las tuberías en el caso de distribución en espiral (izquierda) y en la de doble serpentin (derecha).

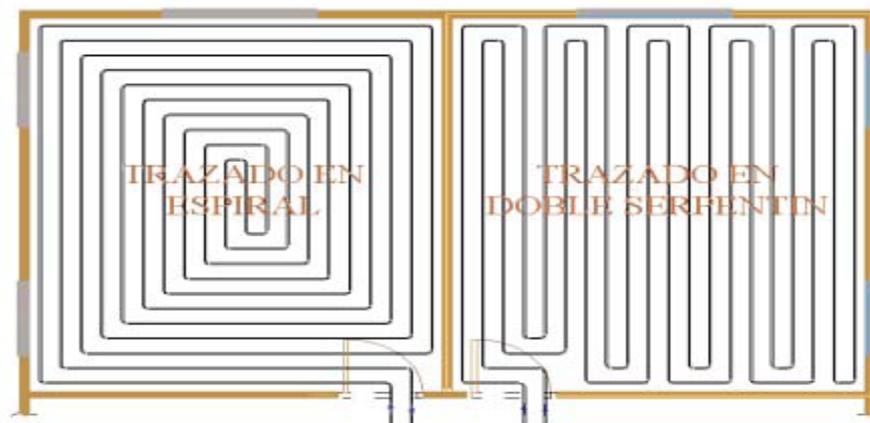


Figura 2-14 Distribución espiral y doble serpentin ( [17])

A pesar del ahorro energético que este tipo de sistemas de distribución interior puede suponer, para su instalación es muy costosa, ya que requiere de levantar todo el suelo del edificio a climatizar, por lo que se suelen realizar únicamente cuando el edificio ya se encuentra en período de obras, o cuando este se encuentra inhabitado. También condiciona mucho si se quieren realizar obras a posteriori de otro tipo,

si para estas fueran necesarias modificaciones en el suelo, ya que casi en su totalidad estará ocupado por las tuberías.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

Durante el siguiente capítulo, se pretende dar una descripción general del cuartel “*Almirante Francisco Moreno*”, edificio sobre el cual se implantará la propuesta de este trabajo. Se expondrá la demanda térmica del edificio en los últimos años, para posteriormente realizar los cálculos de dimensionamiento y selección de la instalación geotérmica que se quiere implantar. También se darán los datos de interés del terreno sobre el que se encuentra el cuartel, puesto que es la fuente principal de la que se obtendrá el calor necesario para climatizar el edificio.

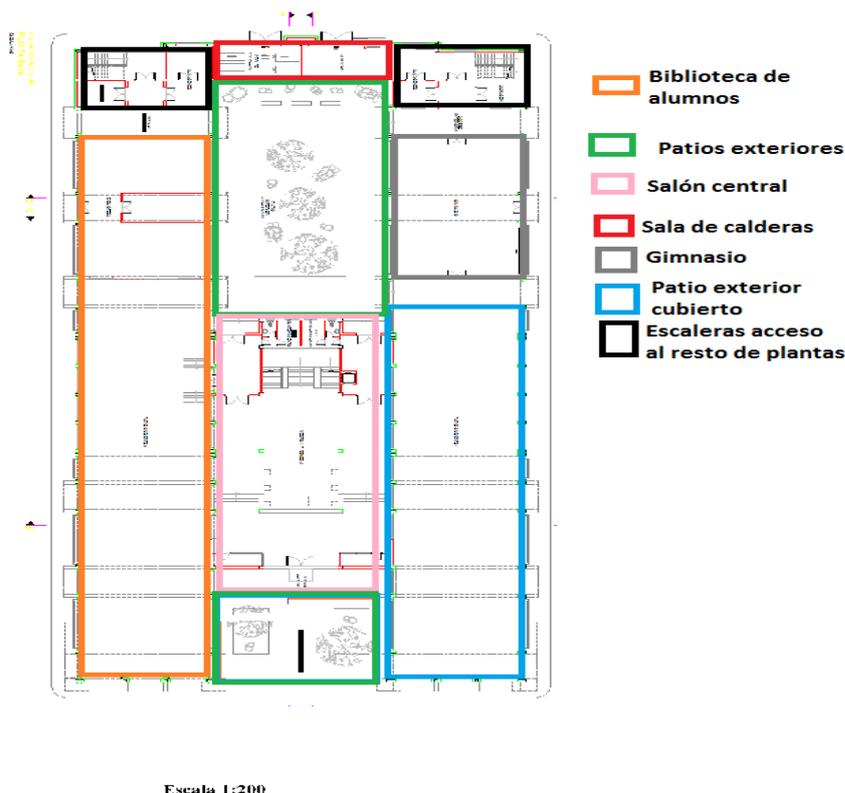
### 3.1 Edificio

#### 3.1.1 Generalidades

El cuartel “*Almirante Francisco Moreno*” se encuentra en la Escuela Naval Militar (Pontevedra). Consta de tres plantas y está construido sobre una superficie de aproximadamente 3.168 m<sup>2</sup>. Como se puede ver en la Figura 3-1 el edificio tiene una clara forma de “H” orientado al E-SE, quedando la zona oeste del edificio cerrada por una sala de calderas en la zona central y unas escaleras de acceso al resto de plantas del edificio en los extremos. El edificio cuenta con dos patios exteriores, separados por un salón interior en la zona central del edificio de unos 130 m<sup>2</sup>. La parte norte de la planta baja conforma un patio cubierto y un pequeño gimnasio, mientras que toda la zona sur conforma una biblioteca. El patio exterior de la cara este da acceso a la entrada principal del edificio. En la Figura 3-2 se muestra una representación gráfica de la planta baja.



**Figura 3-1** Cuartel Almirante Francisco Moreno (Proporcionado por la Escuela Naval Militar).



**Figura 3-2 Planta baja “Almirante Francisco Moreno” (Proporcionado por la Escuela Naval Militar)**

La primera y segunda planta del edificio, son prácticamente simétricas, donde se encuentran las habitaciones, aseos y zonas comunes. Cada una de las cuáles se dividen 2 módulos también simétricos, y a su vez, cada módulo se divide en dos alas. Ambos módulos se encuentran separados por un salón común en la zona central de ambas plantas de unos 201 m<sup>2</sup>. Cada módulo consta de 22 habitaciones con dos literas cada una, lo que hace un total de 88 habitaciones entre ambas plantas y una capacidad para 352 alumnos. Por cada dos habitaciones del edificio, hay un estudio con una mesa para 8 alumnos. La superficie total de cada planta es de 2127,28 m<sup>2</sup>. En la Tabla 3-1 se muestra la superficie de cada una de las plantas divididas por zonas, representadas en la Figura 3-3.

| ESTANCIA     | SUPERFICIE (m <sup>2</sup> ) |
|--------------|------------------------------|
| Ala NO       | 400,23                       |
| Ala NE       | 400,23                       |
| Ala SO       | 400,23                       |
| Ala SE       | 400,23                       |
| Hall Central | 201                          |
| Baños        | 324,64                       |

**Tabla 3-1 Superficie por zonas**

Por tanto, la superficie total a climatizar del edificio es de 4254 m<sup>2</sup>, suma de la superficie útil de la primera y segunda planta, ya que es donde los alumnos pasan la mayor parte de su tiempo, y donde se sitúan las duchas y lavabos. En la Figura 3-3 se muestra la distribución por zonas de la primera y segunda planta. En el Anexo II se muestra con más detalle el plano de la primera y segunda planta.

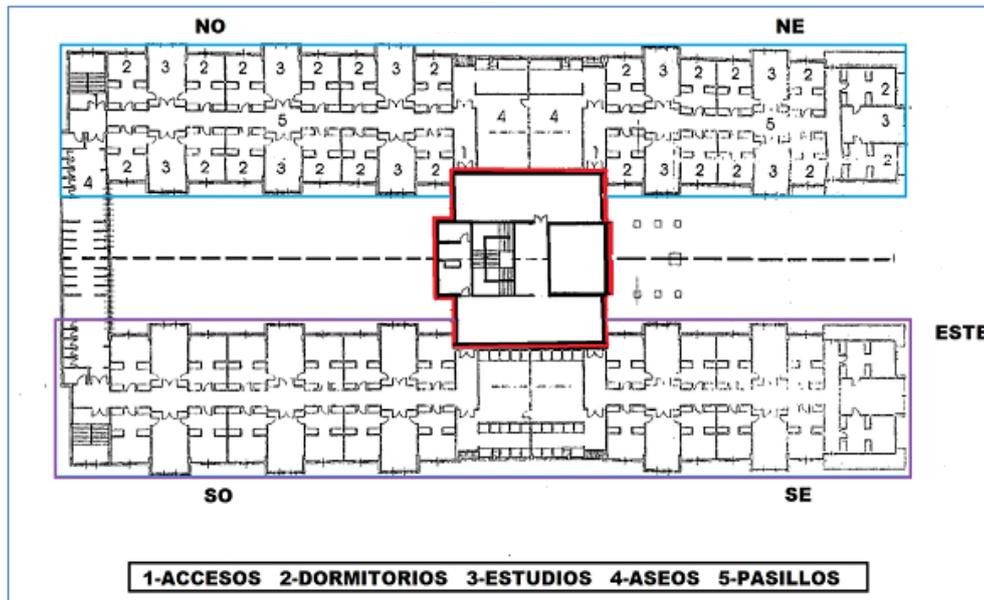


Figura 3-3 Plano de la primera y segunda planta del edificio (Proporcionado por la Escuela Naval Militar)

En cuanto a la cimentación del edificio, está formada principalmente por pilotes de hormigón armado de 400 Kg de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón y unas vigas de cimentación en encepado de los pilotes, también de hormigón armado.

Por otro lado, las fachadas del edificio están principalmente constituidas por un conjunto de aplacados de granito pulido, zonas de mortero mono capa, paneles prefabricados para las ventanas y unas zonas de ladrillo de cerámica esmaltada. La cubierta del edificio está formada por un conjunto de tejas cerámicas sobre paneles bituminados de fibrocemento. Ya por último nombrar que las ventanas del edificio están hechas de vidrio, y el pavimento del interior del edificio está hecho de mármol. Para más información sobre las características arquitectónicas del edificio, mirar el proyecto referenciado. [8]

### 3.1.2 Climatización

Para climatizar cada una de las zonas habitables del edificio, actualmente cuenta con un sistema mixto de calefacción y producción de agua caliente sanitaria a través de dos acumuladores y dos quemadores cuyo combustible es el gas natural. Cada una de las calderas es de tipo Roca BT 3500, con una potencia nominal de 580 kW cada una, suficiente para cubrir la demanda requerida por el edificio. Las especificaciones técnicas la caldera indican que el rendimiento de combustión es del 91%. Estas calderas son las encargadas de calentar el agua del circuito cerrado de calefacción. La instalación también cuenta con dos acumuladores de ACS, cada uno de los acumuladores tienen una capacidad de 3000 litros de agua, esta agua es calentada mediante un intercambiador de calor situado entre el circuito cerrado de calefacción, y el circuito destinado a enviar el agua caliente a los acumuladores. [8]

El sistema de distribución de calor en el interior del edificio se realiza mediante radiadores de agua caliente, un total de 206 radiadores distribuidos por todo el edificio de la siguiente manera: 14 radiadores en el salón central de la planta baja, 4 radiadores en la zona central de la primera planta y otros 4 en la zona central de la segunda planta, 20 radiadores distribuidos por todos los aseos de la primera y segunda planta, un radiador por habitación y otro por estudio, además de los 8 radiadores por cada módulo. Todos ellos destinados a proporcionar el calor necesario para mantener el confort en una superficie útil total de 4254 m<sup>2</sup>.

La Escuela Naval cuenta con 5 depósitos de agua potable de 132.000 toneladas en total, para proporcionar agua potable a todas las dependencias de la Escuela Naval Militar, incluyendo el cuartel “Almirante Francisco Moreno”.

Es importante destacar que este edificio no dispone de sistema de refrigeración, debido a que habitualmente en los períodos en los que su uso sería necesario, los alumnos que lo habitan se encuentran en su permiso de vacaciones, por lo que supondría un gasto completamente innecesario.

### 3.1.3 Consumos

En el proyecto realizado por un alumno en el año 2015 [8], se realizó exhaustivo estudio sobre las características arquitectónicas del “*Almirante Francisco Moreno*”, para posteriormente poder calcular de manera estimada la energía necesaria que tenía que consumir el edificio para cubrir las necesidades energéticas del mismo, obteniendo un consumo anual entre calefacción y ACS de 1.038 MWh/año, así como las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la instalación de calefacción y agua caliente sanitaria. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3-2 y en la Tabla 3-3.

| CALEFACCIÓN                           | ACS                                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año | KgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año |
| 35,66                                 | 66.98                                 |

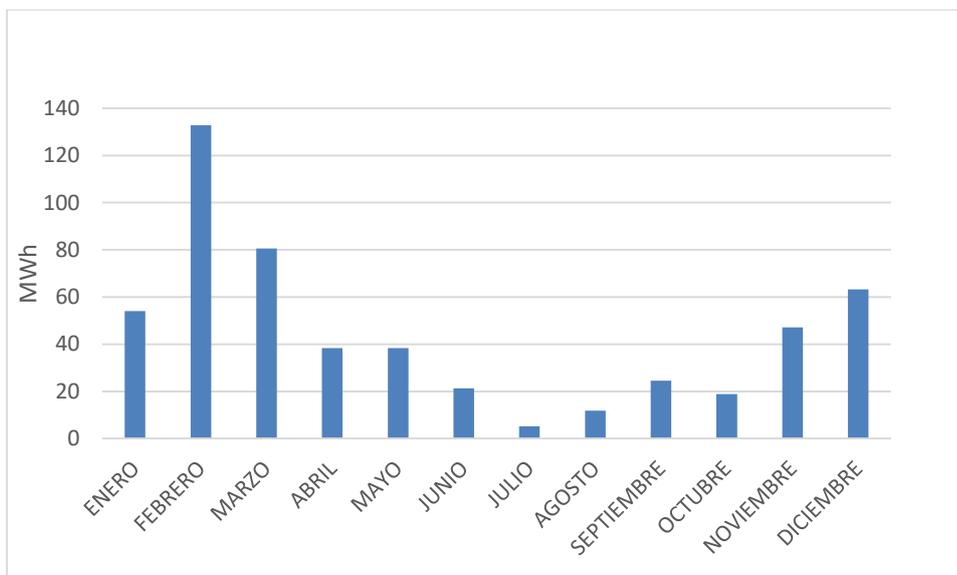
**Tabla 3-2 Emisiones CO<sub>2</sub> ([8])**

| CALEFACCIÓN            | ACS                    |
|------------------------|------------------------|
| kWh/m <sup>2</sup> año | kWh/m <sup>2</sup> año |
| 176,55                 | 331,60                 |

**Tabla 3-3 Demanda anual ([8])**

Cabe destacar que, estos datos son obtenidos según un estudio realizado, en el que se presupone que el edificio se encuentra en su máxima ocupación durante todo el año, es decir, un total de 352 alumnos, y que un alumno consume al día una cantidad aproximada de 100 litros diarios de agua caliente sanitaria en cuestiones de aseo tales como duchas o afeitados, así como el agua de las cisternas, lavado de dientes etc. También, se supuso que la calefacción está en permanente funcionamiento durante todo el año. Hay que tener en cuenta que el edificio se encuentra deshabitado durante los períodos vacacionales, lo que reduce importantemente el consumo de ACS y calefacción anual, y que el agua de las cisternas y la empleada para los lavabos normalmente no ha de ser calentada, por lo que la cantidad de litros diarios de ACS consumidos por cada alumno está ligeramente sobre estimada. Por ello, el sistema de este trabajo se dimensionará en función de la demanda anual del edificio, para ello, se ha multiplicado el rendimiento de la instalación actual (91%) a la media obtenida de los consumos entre los años 2013, 2014, 2015 y 2016 tanto de ACS como de calefacción, del cuartel “*Almirante Francisco Moreno*”.

Estos datos han sido proporcionados por la Escuela Naval Militar. El gráfico mostrado en la Figura 3-4, muestra la demanda anual de ACS y calefacción en MWh, obtenida, lo que dio una cantidad total de 467,88 MWh/año.



**Figura 3-4 Demanda anual de ACS y Calefacción entre los años 2013 y 2016**

En vista de los resultados obtenidos, podemos observar la gran diferencia de demanda entre los meses de invierno y el resto de estaciones del año. Esto no sólo se debe a que las bajas temperaturas invernales hacen que la demanda energética aumente, también a que, durante la mayor parte de los meses de junio, julio y agosto, el edificio se encuentra inhabilitado debido al período de prácticas de los alumnos y de su permiso de vacaciones.

La carga punta de demanda de calefacción y ACS se produce en febrero, con una demanda aproximada de 135 MWh, que, pasado a kW, suponiendo que está en funcionamiento las 24 horas del día durante los 28 días del mes, se obtiene un valor de máxima potencia calorífica requerida de 201 kW.

### 3.1.3.1 Cálculo demanda ACS

Para poder calcular que parte de la demanda anual es para la producción de ACS, hay que seguir las indicaciones de la sección HE 4 del Documento Básico de Ahorro de Energía del CTE [9]. En el caso de este trabajo se calculará la demanda del mes que requiere más consumo, que como se puede ver en la Figura 3-4, se produce en el mes de febrero. Se supondrá que durante este mes el edificio se encuentra en su máxima ocupación, es decir, 352 alumnos, y que cada alumno consume unos 55 litros diarios de ACS a 60 °C de temperatura, tal y como estipula la tabla 38 de la sección HE.

| Demanda de referencia a 60 ° C                   |                                  |
|--|----------------------------------|
| Criterio de demanda                              | Consumo ACS[litros/día] a 60 ° C |
| Viviendas unifamiliares                          | 30 por persona                   |
| Viviendas multifamiliares                        | 22 por persona                   |
| Hospitales y clínicas                            | 55 por cama                      |
| Hoteles (4 estrellas)                            | 70 por cama                      |
| Hoteles (3 estrellas)                            | 55 por cama                      |
| Hoteles/Hostales (2 estrellas)                   | 40 por cama                      |
| Camping  | 40 por emplazamiento             |
| Hostales/Pensiones (1 estrella)                  | 35 por cama                      |
| <b>Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)</b> | <b>55 por cama</b>               |
| Vestuarios/Duchas colectivas                     | 15 por servicio                  |
| Escuelas   | 3 por alumno                     |

**Tabla 3-4 Demanda ACS a 60 °C ([9])**

La energía requerida para calentar los 55 litros por alumno, de acuerdo con lo exigido por el DB HE 4 [9], se calcula de la siguiente manera:

$$E = Q \cdot Ce \cdot (T - T_i) / 1000 = 25 \text{ MWh/mes}$$

**Ecuación 3-1**

Donde:

- E*: Energía total demandada para el mes de febrero en MWh.
- Q*: Demanda en febrero de ACS a 60 °C en litros. (542080 litros)
- Ce*: Calor específico del agua, con un valor de 4.186 Julios/litro °C
- T*: Temperatura del acumulador en °C.
- T<sub>i</sub>*: Temperatura media del agua fría en el mes de febrero en °C.

Tomando como referencia la demanda de ACS obtenida para el mes de máxima demanda, se puede decir que de los 135 MWh/mes consumidos entre ACS y calefacción, tan sólo 25 MWh/mes irán destinados a la producción de ACS mientras que 110 MWh/mes restantes irán destinados al uso de la calefacción.

### 3.1.4 Análisis del terreno.

Al ser la tierra la fuente principal de suministro de calor, es fundamental conocer las propiedades del terreno en donde se ubica el edificio. El intercambio de calor depende de la conductividad térmica del edificio, el cual se calcula en función del tipo de terreno y de tres características de este, tales como densidad, humedad y textura del suelo, por lo que el parámetro fundamental que se necesita conocer es

el coeficiente de conductividad térmica del subsuelo y la temperatura del terreno no alterado, así como saber cómo influyen las posibles aguas subterráneas que podamos encontrar. Cuanto más elevado sea el coeficiente de conductividad térmica, la energía térmica se transportará más rápidamente hacia la sonda en modo calefacción, además, la regeneración de la temperatura del subsuelo será también más rápida.

Para poder obtener estos datos, existe lo que se denomina Test de Respuesta Geotérmica, el cual permite conocer una gran cantidad de propiedades del subsuelo, el inconveniente es que es un test para el cual se requieren muchos medios y es muy costoso, por lo que, cuando no se dispone de los medios necesarios, se suele hacer una estimación de las propiedades del subsuelo, mediante documentación ya existente. Hay que tener en cuenta que esta segunda opción, no realiza un estudio tan exhaustivo del terreno como lo hace el Test de Respuesta Geotérmico, por lo que la eficiencia de la instalación podrá verse ligeramente perjudicada. En el caso de este proyecto se consultarán los datos al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) [18], ya que dispone de mapas de los que se puede sacar las características geológicas del subsuelo de toda España, en concreto la hoja del MAGNA (Mapa Geológico Nacional). En los siguientes subapartados se pasará a explicar ambos métodos.

### 3.1.4.1 Test de respuesta geotérmica

El Test de Respuesta Geotérmico, se realiza mediante un sondeo piloto, en el que mide la variación de temperatura resultante de hacer circular un fluido por el interior del sondeo al introducir una determinada cantidad de potencia térmica en la perforación. Estas temperaturas son registradas y mediante ordenadores, se obtienen unas curvas de evolución de la temperatura del fluido, que adquieren una pendiente constante a medida que transcurre un tiempo, a partir de la cual se obtiene la conductividad térmica del subsuelo.

El esquema principal del Test de Respuesta Geotérmico se muestra en la Figura 3-5.

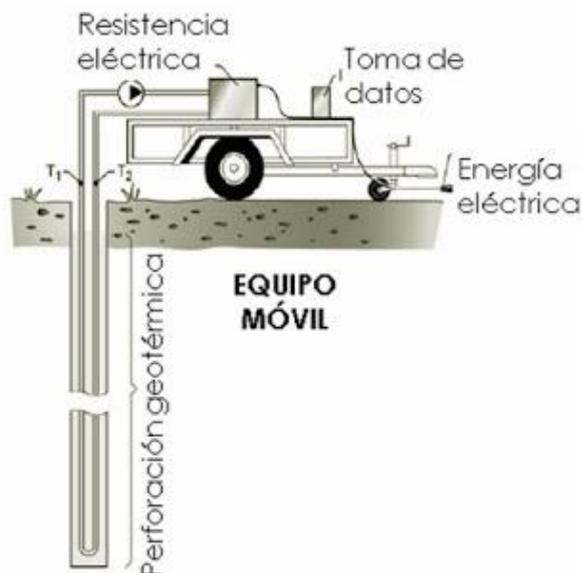
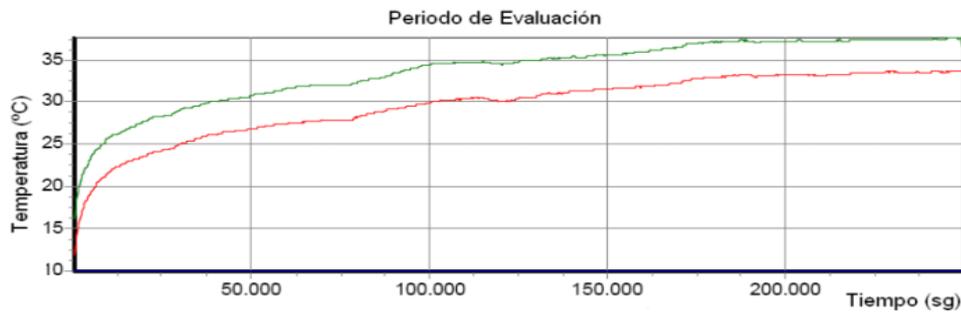


Figura 3-5 Esquema Test de Respuesta Geotérmico ( [6])

La energía térmica que introduce en el subsuelo mediante el empleo de una calefacción o de resistencias eléctricas, aunque hay que tener en cuenta que se pueden producir variaciones de voltaje en la red con el uso de la calefacción y esto pueden provocar variaciones sobre la cantidad de energía que se introduce en el subsuelo. También existen factores externos como la lluvia, que pueden provocar cambios de temperatura si las perforaciones no están realizadas correctamente y permiten que el agua pueda introducirse en el pozo. Por ello, es conveniente que los ensayos duren el tiempo suficiente como para evitar las fluctuaciones de potencia y las influencias climáticas, permitiendo que los resultados

obtenidos sean más fiables. En la Figura 3-6 viene representada la curva estándar de un test con baja influencia de los factores externos mencionados [6].



**Figura 3-6 Gráfico temperatura ( [6])**

Para calcular la duración mínima del ensayo recomendada, se utiliza la siguiente expresión:

$$tb \geq \frac{5r^2}{\alpha}$$

**Ecuación 3-2**

tb: Límite de tiempo inferior para que los datos obtenidos puedan ser utilizados

r: Radio del sondeo

$\alpha$ : Difusividad térmica.

Para la evaluación de los datos obtenidos, se emplea una fórmula dada por Eklöf Gehlin en 1996 [12], de la cual podemos obtener la conductividad térmica:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi HK}$$

**Ecuación 3-3**

K: Relación entre la pendiente de la curva y el tiempo logarítmico.

Q: Calor introducido o extraído.

H: Longitud del sondeo

$\lambda$ : Conductividad térmica.

El Test de Respuesta Geotérmica también resulta fundamental para aumentar el rendimiento del terreno de captación geotérmica, ya que con este test se puede obtener el valor de un parámetro primordial para aumentar este rendimiento, como es la resistencia a la perforación. Este parámetro aumenta con el aumento del diámetro de perforación, sin embargo, mediante estudios realizados, se observó que, aumentando la conductividad térmica en el material de relleno, la resistencia térmica disminuía [6].

En conclusión, empleando el Test de Respuesta Geotérmico, se obtienen datos muy precisos del subsuelo, lo que, de forma indirecta, aumenta el rendimiento de la instalación, ya si se obtienen los datos de forma teórica, existe mayor probabilidad de que se produzcan errores en el dimensionamiento del terreno de captación, lo que puede afectar al óptimo funcionamiento de la instalación.

### 3.1.4.2 Mapas IGME

Como ya se ha mencionado, para la realización de este trabajo no se dispone de los medios necesarios para realizar el Test de Respuesta Geotérmico. Mediante las hojas MAGNA, proporcionada por el IGME [18], se obtienen las características geológicas del subsuelo y su coeficiente de conductividad térmica. Con estos datos entre otros, se podrán realizar los cálculos convenientes para la selección de la bomba de calor geotérmica adecuada, profundidad necesaria para los captadores geotérmicos y el número de pozos necesarios.

La Hoja número 04-10 (185) PONTEVEDRA, a escala 1:50.000, muestra la composición del subsuelo en función de la localización, y a partir de esta composición se obtiene el coeficiente de conductividad térmica del terreno.

Como se muestra en la Figura 3-7 la zona en la que se sitúa el cuartel “*Almirante Francisco Moreno*” está formada por rocas ígneas, es decir, por granitos de afinidad alcalina y granito de feldespato álcali, se puede observar con más detalle en el Anexo I.

Según la norma VDI 4640- parte 2 [10], conociendo la composición del subsuelo podemos obtener la conductividad térmica de este entrando una tabla como la mostrada en la Figura 3-8, en nuestro caso, al tener un subsuelo de granito, sacamos en valor típico de la conductividad térmica:

$$\lambda = 3,4 \text{ W/m.K}$$

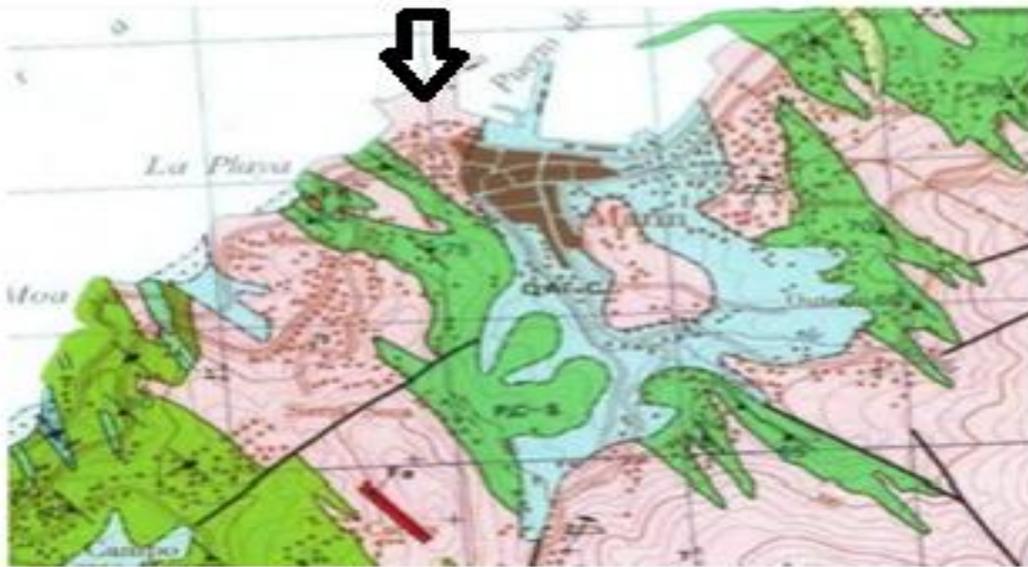


Figura 3-7 Parte del MAGNA en la que se encuentra el edificio ( [18])

| TIPO DE ROCA                 | Densidad<br>10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> | Conductividad térmica<br>(W/mK) |              |      | Capacidad térmica<br>volumétrica<br>(MJ/m <sup>3</sup> K) |
|------------------------------|---|---------------------------------|--------------|------|---|
|                              |   | min.                            | valor típico | max. |   |
| <b>Íocas magmáticas</b>      |   |                                 |              |      |   |
| Basalto                      | 2,6 - 3,2                                     | 1,3                             | 1,7          | 2,3  | 2,3 - 2,6   |
| Diorita                      | 2,9 - 3,0                                     | 2                               | 2,6          | 2,9  | 2,9   |
| Gabro                        | 2,8 - 3,1                                     | 1,7                             | 1,9          | 2,5  | 2,6   |
| Granito                      | 2,4 - 3,0                                     | 2,1                             | 3,4          | 4,1  | 2,1 - 3,0   |
| Peridotita                   | 3,0   | 3,8                             | 4            | 5,3  | 2,7   |
| Folita                       | aprox. 2,6                                    | 3,1                             | 3,3          | 3,4  | 2,1   |
| <b>Íocas metamórficas</b>    |   |                                 |              |      |   |
| Gneis                        | 2,4 - 2,7                                     | 1,9                             | 2,9          | 4    | 1,8 - 2,4   |
| Mármol                       | 2,5 - 2,8                                     | 1,3                             | 2,1          | 3,1  | 2   |
| Metacuarcita                 | aprox. 2,7                                    |                                 | aprox. 5,8   |      | 2,1   |
| Micasquistos                 | aprox. 2,6                                    | 1,5                             | 2            | 3,1  | 2,2   |
| Esquistos arcillosos         | 2,7   | 1,5                             | 2,1          | 2,6  | 2,2 - 2,5   |
| <b>Íocas sedimentarias</b>   |   |                                 |              |      |   |
| Caliza                       | 2,6 - 2,7                                     | 2,5                             | 2,8          | 4    | 2,1 - 2,4   |
| Marga                        | 2,5 - 2,6                                     | 1,5                             | 2,1          | 3,5  | 2,2 - 2,3   |
| Cuarcita                     | aprox. 2,7                                    | 3,6                             | 6            | 6,6  | 2,1 - 2,2   |
| Sal                          | 2,1 - 2,2                                     | 5,3                             | 5,4          | 6,4  | 1,2   |
| Arenisca                     | 2,2 - 2,7                                     | 1,3                             | 2,3          | 5,1  | 1,6 - 2,8   |
| Íocas arcillosas, limosas    | 2,5 - 2,6                                     | 1,1                             | 2,2          | 3,5  | 2,1 - 2,4   |
| <b>Íocas no consolidadas</b> |   |                                 |              |      |   |
| Grava, seca                  | 2,7 - 2,8                                     | 0,4                             | 0,4          | 0,5  | 1,4 - 1,6   |
| Grava, saturada de agua      | aprox. 2,7                                    |                                 | aprox. 1,8   |      | aprox. 2,4  |
| Morena                       | -   | 1                               |              | 2,5  | 1,5 - 2,5   |
| Arena, seca                  | 2,6 - 2,7                                     | 0,3                             | 0,4          | 0,8  | 1,3 - 1,6   |

**Figura 3-8 Conductividad térmica para diferentes materiales ( [10])**

## 3.2 Elección y dimensionamiento de la instalación geotérmica

### 3.2.1 Circuito de captación exterior

Debido al gran tamaño del edificio a climatizar, y la necesidad de garantizar el 100% de eficiencia en la climatización, el sistema elegido es el circuito de captación vertical explicado en el apartado 2.3.1.2. Al no haber sido posible realizar un estudio a fondo del subsuelo, no se tiene la certeza de la existencia de suficiente agua subterránea como para emplear el sistema de circuito de captación abierto, por lo que se descarta este sistema de captación. Por otro lado, los alrededores del edificio no cuentan con el área libre de parcela suficiente como para emplear el sistema de captación horizontal, ya se necesitaría una superficie de más de 8.000 m<sup>2</sup>. Además, como ya se comentó, el sistema de captación vertical es más eficiente que el sistema de captación horizontal.

#### 3.2.1.1 Cálculo de longitud del sondeo

Para calcular la dimensión del sistema de captación seleccionado, se pueden emplear dos métodos simplificados de cálculo, dependiendo del tamaño del edificio a climatizar.

El factor principal que se necesita conocer para el dimensionamiento de las tuberías de captación es la conductividad térmica del terreno, ya obtenido en el apartado 3.1.4.2. Además de la conductividad térmica, se necesitan conocer los siguientes datos:

- El COP de la bomba de calor.
- Temperatura del terreno.
- Diámetro de las tuberías de captación.
- Carga punta de calefacción.
- Horas de funcionamiento anuales de la bomba de calor.
- Extracción de calor específica.
- Temperaturas de trabajo límites de la bomba de calor.

El primer método que se empleará viene definido por la norma alemana VDI 4640 – Parte 2 [10], sin embargo, esta norma menciona que sólo se suele emplear cuando la potencia calorífica necesaria para climatizar el edificio no supere los 30 KW.

A través la tabla mostrada en la Figura 3-9 se puede obtener la extracción de calor específica en W/m para operaciones anuales de calefacción de 1800 y 2400 horas, dependiendo del material del subsuelo y de su conductividad térmica.

| SUBSUELO  | EXTRACCIÓN DE CALOR ESPECÍFICA (W/m) |              |
|---|--------------------------------------|--------------|
|   | Para 1.800 h                         | Para 2.400 h |
| <i>Valores generales:</i>   |                                      |              |
| Terreno malo (sedimento seco) ( $\lambda < 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ )                          | 25                                   | 20           |
| Terreno duro normal y sedimentos saturados de agua ( $\lambda = 1,5-3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) | 60                                   | 50           |
| Roca consolidada con conductividad térmica elevada ( $\lambda > 3,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ )     | 84                                   | 70           |
| <i>Rocas individuales:</i>  |                                      |              |
| Grava, arena, secas   | <25                                  | <20          |
| Grava, arena, saturados de agua   | 65-80                                | 55-65        |
| Flujo de agua subterránea elevado en arenas y gravas (para sistemas individuales)                     | 80-100                               | 60-100       |
| Arcilla, marga, húmedas   | 35-50                                | 30-40        |
| Caliza (masiva)   | 55-70                                | 45-60        |
| Arenisca  | 65-80                                | 55-65        |
| Rocas magmáticas silíceas (ej.: granito)  | 65-85                                | 55-70        |
| Rocas magmáticas básicas (ej.: basalto)   | 40-65                                | 35-65        |
| Gneis   | 70-85                                | 60-75        |

Figura 3-9 Extracción de calor específica posibles para intercambiadores verticales ( [10] )

Sin embargo, la normativa establece las siguientes condiciones para emplear los valores obtenidos de la extracción de calor específica:

- Sólo extracción de calor (calefacción incluyendo agua caliente)
- Longitud del intercambiador vertical ha de estar comprendida entre 40 y 100 m. (Se refiere a la profundidad del sondeo).
- Distancia mínima entre los sondeos ha de ser al menos de 5 m para sondeos de 40 a 50 m de longitud, y de al menos 6 m para sondeos de 50 a 100 m de longitud.
- Tubos en forma de U como los mostrados en la Figura 2-6.
- No se aplica a un gran número de sistemas pequeños en un área limitada.

El calor que ha de aportar el terreno se calcula como:

$$Q_{\text{sondeo}}(kW) = Q_{\text{calef}}(kW) \cdot (\beta - 1) / \beta$$

Ecuación 3-4

Siendo  $Q_{\text{calef}}$  la carga punta de calefacción que puede dar el edificio a lo largo de todo el año.

Finalmente, como establece la normativa, la longitud del sondeo se obtiene empleando la siguiente ecuación:

$$L_{\text{sondeo}}(m) = \frac{Q_{\text{sondeo}}(kW)}{\text{Extracción de calor específica} \left( \frac{W}{m} \right)}$$

Ecuación 3-5

Estos cálculos que explica la normativa, sólo son válidos cuando se trata de una instalación de climatización sólo para proporcionar calor o refrigeración, en el caso de que se quieran realizar operaciones auxiliares análogas, como por ejemplo la producción de agua caliente sanitaria, habría que tener en cuenta un factor conocido como “ $\alpha$ ”, que es el factor de eficiencia anual del caso anterior, pero al que ya se le ha restado la energía requerida para las operaciones auxiliares. Este valor se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{Qh}{\frac{Qh}{\beta} - Pp}$$

**Ecuación 3-6**

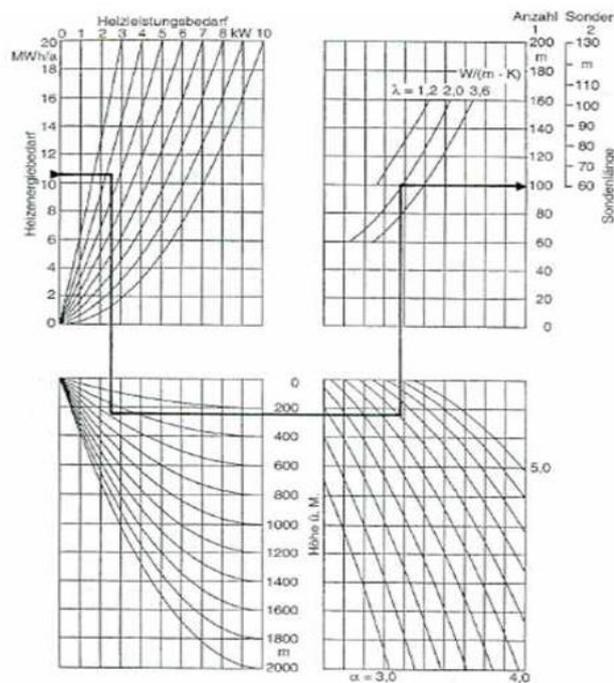
Donde:

$Qh$ = Demanda calorífica anual en kWh/a

$\beta$ = Factor de eficiencia anual

$Pp$ = Energía consumida por componentes auxiliares en kWh/año

Una vez calculado este valor, se introduce en un monograma creado en Suiza por la Oficina Federal de Energía Económica, junto con el valor de la altitud sobre el nivel del mar a la que se encuentra el edificio a climatizar, la conductividad térmica del terreno, y la demanda anual calorífica, se pueden extraer de este monograma el número y longitud de los pozos. El monograma viene mostrado en la figura:



**Figura 3-10 Monograma para diseño intercambiadores verticales ( [10])**

Sin embargo, para el empleo de este monograma, la normativa aplica unos límites de potencia calorífica de entre 3 y de 10 kW, y de demanda anual energética calorífica de entre 4 y 16 MWh/a. Como se puede comprobar observando los datos obtenidos en el apartado 3.1.3, los valores obtenidos están muy por encima de los límites de empleo de este monograma, además, como ya se mencionó, esta normativa no recomienda el empleo de este método para edificios que requieran más de 30 kW de potencia calorífica.

Por ello, para el dimensionamiento del sistema de captación vertical de la instalación de este proyecto, se empleará un segundo método opcional, ofrecido por “La American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHARE)”, en la publicación “**Comercial / Institutional GSHP Engineering Manual, (1995)**” [11]. Este método consiste en una regla simplificada para poder calcular la longitud del sondeo para instalaciones con grandes cargas de calefacción y de refrigeración. [6]

Este método se basa en la cantidad de energía neta extraída del subsuelo para su empleo en calefacción, y también suponer, que se emplean unas tuberías de captación de 31,8 mm de diámetro.

La fórmula para el caso de calefacción es la siguiente:

$$L_{cal}(m) = 0,05506 \frac{\text{Cantidad anual de energía extraída del terreno (MJ)}}{T_{\text{terreno en profundidad (}^\circ\text{C)} - T_{\text{entrada min(}^\circ\text{C)}}$$

**Ecuación 3-7**

Para calcular cantidad anual de energía extraída del terreno, se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Calor extraído del terreno} = \text{Carga punta de calefacción} \times \text{FPPc} \times \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}}$$

**Ecuación 3-8**

Donde:

FPP es el número de hora de funcionamiento a máxima potencia.

COP rendimiento de la bomba de calor, explicado en el apartado 1.1.1.

Como ya se comentó en el apartado 2.3, la temperatura del terreno en España a partir de los 20 metros de profundidad, apenas varía, y se encuentra entre los 12 °C y 17 °C, en el caso de este trabajo, para el terreno en el que se sitúa el edificio se empleará una temperatura de 15 °C, que es la temperatura media de la tierra, que se puede asumir como la temperatura seca anual del lugar del edificio [6], obtenida por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [14], para la provincia de Pontevedra. Por otra parte, la diferencia de temperatura entre el terreno y la del fluido intercambiador del circuito de captación, no debe ser mayor de 15 °C para instalaciones de alta carga térmica (como es el caso de este trabajo) [2], para que se pueda efectuar el correcto intercambio de calor. Además, el límite de temperaturas de entrada en el intercambiador de calor, no debe de ser menor de -5 °C, para evitar posibles congelaciones en el subsuelo, ni sobrepasar los 30 °C, para evitar posibles degradaciones de las tuberías [6]. Por ello, para este trabajo, se establecerá una temperatura mínima de entrada de 0 °C y una máxima de 29°C.

Para la bomba de calor seleccionada, se obtiene un COP de 4,2 (tal y como se explicará en la siguiente sección), y la carga punta de calefacción y ACS se obtuvo en el apartado 3.1.3, con un valor de 201Kw. El número de horas de funcionamiento a máxima carga se establecerá en 2400 horas anuales. En la Tabla 3-5 se muestra la longitud total del sondeo necesaria para garantizar la máxima demanda de calefacción y ACS, realizados en una hoja de cálculo Excel.

| COP | FPP (horas) | Q <sub>calef</sub> (kW) | Q <sub>ext terreno</sub> (MJ) | T <sup>a</sup> terreno (°C) | T <sup>a</sup> max. Ent (°C) | L <sub>sondeo</sub> (m) |
|-----|-------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 4,2 | 2400        | 201                     | 1323154,286                   | 15                          | 0                            | 4856,858331             |

**Tabla 3-5 Longitud perforaciones**

### 3.2.1.2 Selección de tuberías de captación

Al ser 4856,85 m de longitud a perforar, realizando perforaciones de 150 m de profundidad, se tendrán que realizar 32 perforaciones si se seleccionan los tubos de simple “U”, y 16 perforaciones si se utilizan los de doble “U”. Las perforaciones se realizará en dos filas de 8 perforaciones cada una, estarán separadas 6 metros entre cada una y la primera fila estará a 9 metros del edificio (la mínima distancia con el edificio permitida es de 2 m), tal y como especifica la norma alemana VDI 4640 [10]. En la Figura 3-11 y Figura 3-12, se muestra el lugar donde se realizarán las perforaciones. Se trata de una explanada rectangular de 46 x 44 m, situada detrás de la cara oeste del edificio, con espacio más que suficiente para realizar las perforaciones, además, es una zona que no tiene ningún uso hoy en día más que para transportar material del CASI de la Escuela Naval Militar a la zona de ejercicios, y las perforaciones no

afectarían en esto, por otro lado, las perforaciones se sitúan justo detrás del cuarto de calderas donde también irá situada la bomba de calor, por lo que no habrá problemas a la hora de conectar el circuito de captación con la bomba de calor. En la Figura 3-13, se muestra una imagen aérea de esta zona.

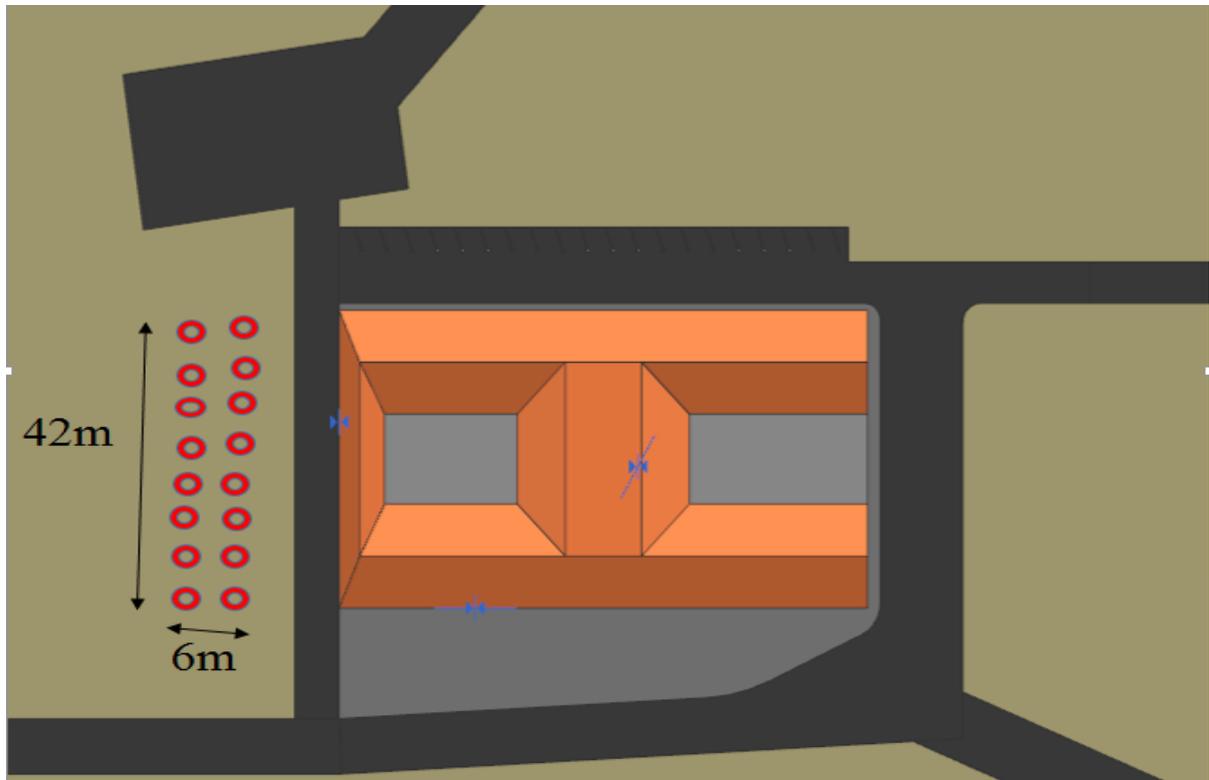


Figura 3-11 Vista aérea de las perforaciones a realizar (SIEMENS NX)

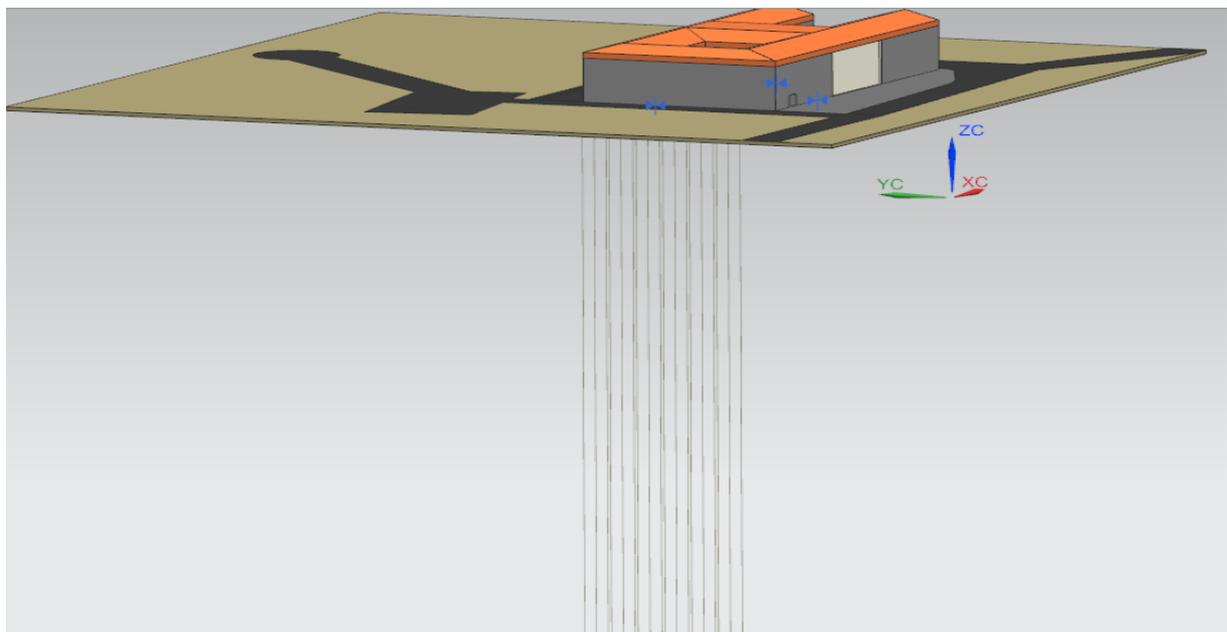


Figura 3-12 Profundidad de las perforaciones (SIEMENS NX)

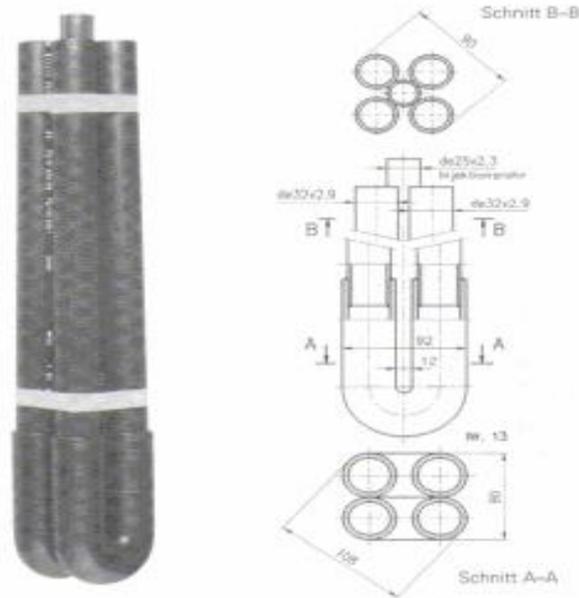


Figura 3-13 Imagen aérea “Almirante Francisco Moreno” (Google Maps)

Para la elección del tipo de tubos de captación vertical, se han elegido los tubos de doble “U” como los mostrados en la Figura 3-14, por el simple motivo de que la superficie de intercambio de calor con el subsuelo es mayor, de esta forma se asegura que se consiga extraer todo el calor necesario para garantizar la demanda del edificio, además de que en vez de tener que realizar 32 perforaciones, bastaría con realizar la mitad de ellas, es decir, 16 perforaciones.

El modelo elegido es el Rehau PE100 RC SDR11 PN16 32 mm x 2,9 de 150 m de longitud con un tubo de inyección PE100 de 25 mm de la marca Rehau [13], fabricados con polietileno de alta densidad [6], ya que a pesar de ser más caros que los polietilenos de baja densidad, son más duros, rígidos y tenaces que los de baja densidad. Como se puede comprobar, el diámetro elegido es de 32 mm, ya que, para la realización de los cálculos, tal y como indicaba la normativa, se tuvo que suponer un diámetro de 31,8 mm, pero al no ser una medida que cumpla con la norma VDI 4640, se ha tenido que optar por este diámetro, que apenas sufre variaciones. El espesor de cada uno de los 4 tubos es de 2 mm, y estos se unen mediante una soldadura que soporta hasta los 20 bares de presión durante mil horas según sus especificaciones técnicas, por lo que se puede asegurar la estanqueidad de estos.

Un elemento fundamental para el sondeo es el pie de sonda, encargado de unir el extremo inferior los tubos captadores. El pie de sonda ya viene incluido en el tipo de modelo de tubería elegido, y está fabricado con el mismo material. A este pie de sonda, se le acoplará un lastre con el objeto de facilitar la introducción de las tuberías en las perforaciones. El modelo seleccionado también es de la marca Rehau, con un peso de 60 kg.



**Figura 3-14 Tubo de doble “U” ([13])**

### 3.2.1.3 Selección fluido circulante

El fluido seleccionado para realizar el intercambio de calor es el propilenglicol (agua con anticongelante), cuya presencia disminuye la temperatura de congelación de 0 °C (solamente agua) a unos -14 °C, además no es corrosivo, tóxico ni inflamable. La proporción será de un 30% de anticongelante y 70% de agua tal y como recomienda el “*International Ground Source Heat Pump Association*” (IGSHPA) [19]. En la Tabla 3-6 se muestran las propiedades principales de este fluido.

#### Propiedades del propilenglicol

|  |          |
|--|----------|
| Conductividad térmica (W/m K)            | 0,480    |
| Capacidad calorífica específica (J/kg K) | 3,759    |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )            | 1,052    |
| Viscosidad (kg/ms)                       | 0,005200 |

**Tabla 3-6 Propiedades propilenglicol ([2])**

Cabe destacar que este refrigerante, a pesar de ser el menos perjudicial para el medio ambiente y más seguro, por debajo de los -9 °C, se vuelve muy viscoso, por lo que para bombearlo se requiere más energía, es por ello que se recomienda trabajar con el fluido a temperaturas superiores a los -5 °C, que, para el caso de la instalación planteada, no supone ningún tipo de problema, ya que, en el caso de este trabajo, el límite de temperaturas establecido es de 0 °C la mínima y 29 °C la máxima, por lo que, el fluido elegido es el propicio para la instalación [2].

Para calcular el caudal de propilenglicol mínimo que ha de circular por las tuberías de captación para poder extraer el calor requerido para cubrir las necesidades del edificio, se emplea la siguiente fórmula [7]:

$$\dot{m}^{calor} = \frac{Q_{d,calor}}{\rho \cdot C_p \cdot (T_{g,wi} - T_{g,wo})} \cdot \frac{(COP_{inv} - 1)}{COP_{inv}} = 1,33 \text{ litros/s} = 4,807 \text{ m}^3/\text{h}$$

**Ecuación 3-10**

Donde:

$\dot{m}^{calor}$  = Caudal necesario.

$Q_{d,calor}$  = Flujo de calor absorbido por la bomba de calor en kW (201 kW).

$\rho$  = Densidad del propilenglicol. Tabla 3-6

$C_p$  = Calor específico del propilenglicol. Tabla 3-6

$T_{g,wi}$  = Temperatura máxima de entrada en el intercambiador en °C. (29 °C)

$T_{g,wo}$  = Temperatura mínima de salida del intercambiador en °C. (0 °C)

COP = Rendimiento en modo calefacción. (4,2)

Para poder impulsar este caudal de propilenglicol, sería necesario incluir en la instalación una bomba impulsora para realizarlo, sin embargo, como se verá a continuación, la bomba de calor seleccionada, incluye un sistema de impulsión hidráulico con capacidad para impulsar hasta un caudal de 40 m<sup>3</sup>/h, más que suficiente como para impulsar los 4,807 m<sup>3</sup>/h requeridos.

Por último, para calcular el volumen total de propilenglicol necesario, basta con conocer la longitud total del circuito de captación (150 m x 4 x 16), el diámetro interior de las tuberías, en el caso de las tuberías elegidas es de 29,7 mm.

$$V_{tuberías} = 1000 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot L = 6650,8 \text{ litros}$$

Ecuación 3-11

### 3.2.1.4 Relleno del sondeo

El diámetro total del conjunto es de 90 mm, por lo que, para asegurar su correcta penetración en la tierra, se realizarán perforaciones de 164 mm de diámetro, tal y como recomienda la normativa alemana [10], donde se introducirá previamente a las sondas de doble U, un tubo de inyección polietileno, también de la marca Rehau, y posteriormente, se rellenará el espacio restante, con una mezcla de arena, bentonina y cemento, con el objeto de evitar pérdidas durante el intercambio de calor y proporcionar mayor elasticidad para evitar roturas, además, realizando este relleno se evita la posibilidad de entrada de contaminantes externos en la perforación. Ciertamente es que la bentonina es un material con muy baja conductividad térmica, pero como ya se ha dicho, la elasticidad que proporciona resulta fundamental para la larga durabilidad del sistema de captación, puesto que se reduce la posibilidad de roturas en las tuberías. En la Figura 3-15 se muestra una tabla con las propiedades de los principales materiales para el relleno del sondeo.

| MATERIAL                           | Conductividad térmica (W/mK) | Conductividad hidráulica | Facilidad de bombeo | Impacto producido por la helada |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Arena saturada de agua             | 1,7 - 2,5                    | Buena                    | -                   |                                 |
| Arena seca                         | 0,3 - 0,6                    | Buena                    | -                   |                                 |
| Arcilla                            | 0,9 - 1,4                    | Baja                     | Mala                | Existe                          |
| Bentonita (1,3 g/cm <sup>3</sup> ) | 0,7                          | Muy baja                 | Buena               | Alto                            |
| Bentonita con arena                | 1,4 - 1,8                    | Muy baja                 | Mala                | Medio                           |
| Bentonita - cemento                | 0,6 - 1,0                    | Muy baja                 | Buena               | Bajo                            |
| Lechada térmicamente mejorada      | 1,6 - 2,0                    | Muy baja                 | Buena               | Bajo                            |

Figura 3-15 Propiedades de los materiales de relleno para sondeos ( [6] )

Para calcular el volumen necesario del material de relleno, se hace la diferencia entre el volumen total de la perforación y el volumen de las tuberías de captación.

Para ello, se utilizan los 164 mm de diámetro y la longitud de esta, que como ya se ha calculado, será de 150 m, por lo que el volumen total de cada perforación será el siguiente:

$$V_{\text{perforación}} = \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{perforación}}}{2} \right)^2 \cdot L_{\text{perforación}} = 3,16 \text{ m}^3$$

**Ecuación 3-12**

Para calcular el volumen de la sonda, se empleará el diámetro exterior de cada tubería, en este caso 32 mm, y su longitud, igual a la de la perforación, de 150 m, hay que tener en cuenta, que este volumen es sólo para una tubería, pero al haber elegido la tubería de doble U, habrá que multiplicar el resultado por 4 (dos tuberías de bajada y dos de subida).

$$V_{\text{sonda}} = \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{sonda}}}{2} \right)^2 \cdot L_{\text{sonda}} = 0,12 \text{ m}^3$$

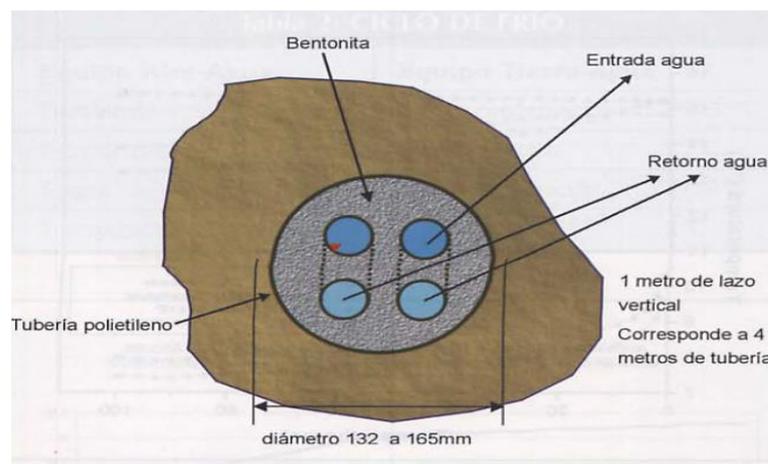
**Ecuación 3-13**

Una vez obtenidos ambos volúmenes, se hace la diferencia de estos, teniendo en cuenta que este volumen está calculado para una sola perforación, por lo que hay que tener en cuenta que habrá que multiplicarlo por las 16 perforaciones que se necesitan.

$$V_{\text{relleno}} = (V_{\text{perforación}} - 4 \cdot V_{\text{sonda}}) \cdot 16 = 42,88 \text{ m}^3$$

**Ecuación 3-14**

En la Figura 3-16 se muestra cómo irían dispuestos los elementos descritos:



**Figura 3-16 Diagrama sistema de captación. ( [12] )**

### 3.2.1.5 Vaso de expansión

El circuito de captación exterior contará con un vaso de expansión para absorber las variaciones de volumen del fluido contenido en el circuito cerrado al variar su temperatura, debido al fenómeno de dilatación que experimentan los cuerpos en general. De esta manera, se evitarán posibles roturas en las tuberías del circuito de captación. Para calcular el volumen necesario que ha de tener el vaso de

expansión, se tendrá en cuenta el procedimiento de la norma UNE 100155:2004 [20], recomendada por el RITE [21].

Para poder calcular el volumen del vaso de expansión, hay que conocer el volumen total del fluido de la instalación ( $V_i$ ) calculado previamente, obteniendo un volumen de 6650,8 litros, la temperatura máxima del fluido anticongelante seleccionado ( $T_{max}= 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la mínima ( $T_{min}= 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), y por último, es necesario el coeficiente de dilatación volumétrica del fluido ( $\beta$ ). Dado que el fluido está formado por un 70% de agua y un 30% de propilenglicol, se necesitarán conocer ambos coeficientes de dilatación, y aplicarle dichos porcentajes a cada uno de ellos. Los coeficientes de dilatación son de  $2,1 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  el del agua, y  $8,1 \times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  el del propilenglicol [22]. Por tanto, tal y como establece la normativa, el volumen del vaso de expansión será:

$$V_{exp} = V_i \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot (\beta_a \cdot 0,7 + \beta_p \cdot 0,3) = 75,2 \text{ litros}$$

**Ecuación 3-15**

El modelo seleccionado, es el 80 AMR-P de la marca SALVADOR ESCODA S.A. [23]. Al no disponer de un depósito de 75 litros, se ha preferido seleccionar uno de 80 litros, de esta forma se dejan unos litros de margen.

### 3.2.2 Bomba de calor

Para esta instalación, se seleccionará una bomba de calor geotérmica, diseñada con el fin de extraer el calor existente en el subsuelo, para satisfacer las necesidades de calefacción y ACS del edificio, compatible con los sistemas de distribución de calor en el interior del edificio mediante agua caliente, como los fancoils, suelo radiante o radiadores (únicamente de baja temperatura).

Para la selección de la bomba de calor, se ha buscado aquella que pueda proporcionar la potencia calorífica demandada por el edificio, que como se puede observar en el apartado 3.1.3, esta máxima demanda se produce en febrero, con un valor de 201kW, incluyendo calefacción y ACS, también se seleccionará teniendo en cuenta que su funcionamiento ha de ser compatible con el fluido anticongelante seleccionado para el circuito de captación exterior.

La bomba de calor seleccionada finalmente es la DS6500-R407C, de la gama alta de la empresa alemana WATERKOTTE [24] como la mostrada en la Figura 3-17, primera en desarrollar e instalar una bomba de calor en Alemania. La gran ventaja de esta empresa es el gran abanico de potencias que ofrecen, ya que muy pocas empresas desarrollan actualmente bombas de calor geotérmicas que proporcionen tanta potencia. Dentro de este modelo, el catálogo ofrece bombas con potencias desde 191 kW hasta 491 kW. En el caso de este trabajo, se ha elegido el modelo 6271.3, que proporciona una potencia calorífica de 221kW, ya que el modelo anterior no proporciona los 201 kW caloríficos requeridos por el edificio. La potencia consumida por el compresor es de 52,3 Kw, obteniendo un COP de 4,2 según las descripciones técnicas, mucho mayor que el que podría ofrecer cualquier otro tipo de bomba de calor convencional. Toda esta potencia es destinada para proporcionar calefacción al edificio, además, como es en el caso de este trabajo, también se empleará para la producción de agua caliente sanitaria, esto se realizará, aprovechando el agua calentada por la bomba de calor del circuito de calefacción, para calentar el agua de los acumuladores de ACS mediante el intercambiador de calor ya existente en la instalación. Esta agua será calentada a una temperatura de unos 45 °C, suficiente para satisfacer las necesidades de los alumnos.

En este trabajo se ha decidido no buscar la reversibilidad de la bomba de calor, debido a que las condiciones climatológicas de la zona, no requieren el uso de aire acondicionado, ya que la temperatura en verano no suele sobrepasar los 25 °C [25]. Además, como ya se ha mencionado, el edificio a climatizar no se encuentra habitado durante el período de verano. Si en algún momento se quisiera refrigerar el edificio, esta bomba ofrece la posibilidad de realizar un enfriamiento pasivo, que se realizaría no

utilizando el compresor, con lo que se obtendría una leve ganancia de enfriamiento más que suficiente como para mantener una temperatura agradable en el interior del edificio en el período veraniego.



**Figura 3-17 Bomba de calor geotérmica DS6500 ( [24]).**

El módulo de la bomba de calor está compuesto por un compresor tipo tornillo de alta eficiencia, el evaporador y condensador son intercambiadores de calor de placas de acero inoxidable que prácticamente, no generan pérdidas de presión, además de una válvula de expansión electrónica que permite la inyección óptima del refrigerante en el evaporador. El compresor de tornillo también permite regular la potencia ente el 75 % y el 100 %. Además, lleva incorporada una bomba impulsora para impulsar el fluido intercambiador de la instalación exterior, con un caudal máximo de 40 m<sup>3</sup>/h según las especificaciones técnicas de la bomba de calor, para un fluido anticongelante formado por 70% agua y 30% propienglicol, como el ya seleccionado. También incorpora otra bomba de impulsión encargada de impulsar el agua del depósito de inercia, para hacerla pasar por el condensador, y así poder calentarla, impulsándola a un caudal máximo de 38,1 m<sup>3</sup>/h.

La instalación incluye un armario de distribución donde está el equipamiento eléctrico, conectado al compresor de la bomba de calor. Este sistema de control está diseñado en una placa de relés, terminal de todos los sensores, entradas digitales y salidas por relés como por ejemplo el relé del circuito de captación. El controlador está conectado a través de una fuente de alimentación de 24 V de corriente continua.

La bomba de calor seleccionada también cuenta con un transductor de baja presión de evaporación uno de alta presión de condensación y 5 sensores para medir la temperatura de cada uno de los circuitos, de esta forma se puede tener un control adecuado del funcionamiento de la bomba de calor. A mayores dispone de un sensor exterior de temperatura y otro para obtener la temperatura del agua caliente sanitaria del circuito.

Como elementos de seguridad, la bomba de calor dispone de un presostato de baja presión de evaporación y otro de alta presión en condensación, además de un sistema de control de secuencia de fases y fallo de fase.

En la Figura 3-18, se muestra con más detalles las especificaciones técnicas de la bomba de calor geotérmica seleccionada.



- Gama de potencias: 191 – 491 kW
- Refrigerante R407C
- Compresor de tornillo
- Regulación de potencia en opción
- Controlador WWPR
- Software de control intuitivo
- Contador COP
- Interfaz web en opción

| DS6500 con R407C  | 6237.3  | 6271.3       | 6299.3       | 6388.3       | 6438.3       | 6485.3       |
|---|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Fuente de calor: agua subterránea</b>                |   |              |              |              |              |              |
| Potencia consumida / entregada W10/W35 <sup>1)</sup>    | kW 46,6 / 238,0                               | 53,9 / 275,3 | 58,3 / 303,0 | 74,4 / 393,9 | 83,6 / 445,0 | 91,2 / 491,6 |
| COP a W10/W35 <sup>2)</sup>                             | 5,1   | 5,1          | 5,2          | 5,3          | 5,3          | 5,4          |
| Límite de operación                                     | W5/W55 (W5/W55 a 75% regulación de potencia)  |              |              |              |              |              |
| <b>Fuente de calor: captación vertical y horizontal</b> |   |              |              |              |              |              |
| Potencia consumida / entregada B0/W35 <sup>1)</sup>     | kW 45,5 / 191,2                               | 52,3 / 221,0 | 55,9 / 243,6 | 72,9 / 316,3 | 80,7 / 356,5 | 87,5 / 394,8 |
| COP a B0/W35 <sup>2)</sup>                              | 4,2   | 4,2          | 4,4          | 4,3          | 4,4          | 4,5          |
| Límite de operación                                     | B-5/W50 (B0/W55 a 75% regulación de potencia) |              |              |              |              |              |
| Compresor   | de tornillo                                   |              |              |              |              |              |
| Regulación de potencia                                  | 75% / 100%                                    |              |              |              |              |              |
| <b>Capacidades, dimensiones, pesos y conexiones</b>     |   |              |              |              |              |              |
| Peso del equipo   | kg 1100                                       | 1160         | 1180         | 1600         | 1660         | 1720         |
| Conexiones fuente de calor / calef.                     | DN / pulg. 80 / 3                             | 100 / 4      | 100 / 4      | 125 / 5      | 125 / 5      | 125 / 5      |
| Dimensiones L X A x P                                   | 2300 x 1815 x 930                             |              |              |              |              |              |

Figura 3-18 Ficha técnica bomba de calor geotérmica seleccionada ( [24])

### 3.2.2.1 Refrigerante de la bomba de calor

Como el propio nombre de la bomba de calor indica, el refrigerante que emplea es el 407C. Un refrigerante de nueva generación que no afecta a la capa de ozono, no es tóxico ni inflamable, por lo que ha pasado a sustituir a los convencionales CFCs y HCFCs explicados en el apartado 2.3.2.3.

El refrigerante 407C se trata de una mezcla zeotrópica, es decir, mezcla en la que la temperatura cambia durante el cambio de fase debido a la diferencia de temperaturas de ebullición de sus componentes. Está formado por los principales gases HFC [2]:

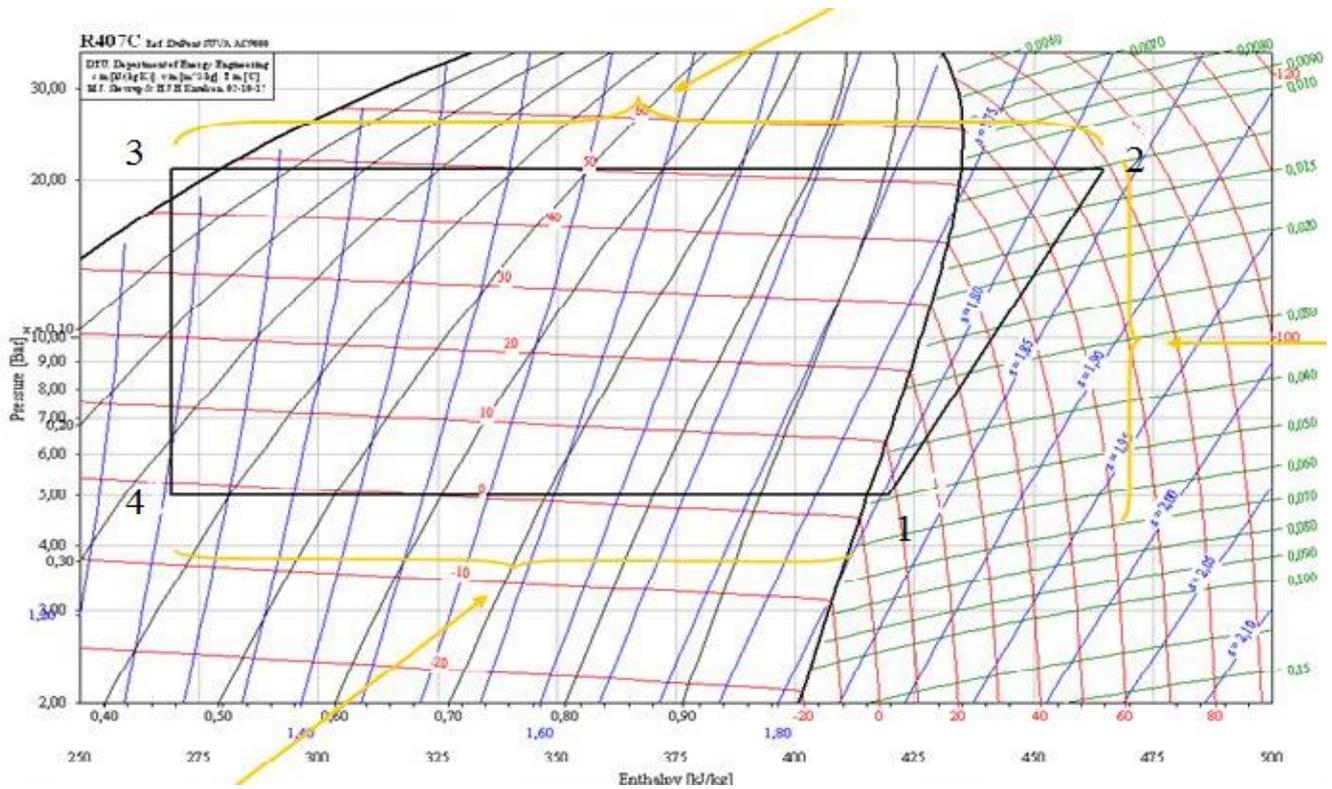
- R-125 en un 25%.
- R-32 en un 23%.
- R-134a en un 52%.

La ventaja de este refrigerante es que permite que no haya gran diferencia entre las temperaturas entre el foco frío y el foco caliente, por lo que como muestra en la Ecuación 1-4, el COP aumenta con respecto a otro tipo de refrigerantes. En esta bomba de calor en concreto, las especificaciones técnicas establecen los siguientes límites de temperatura de trabajo en el evaporador y en el condensador:

- Evaporador: -5 °C
- Condensador: 50 °C

Este límite de temperatura en la entrada del evaporador, permite cumplir con las necesidades de mantener una diferencia de temperaturas entre la entrada al evaporador y el suelo en 15 °C. De esta forma, se podrá absorber correctamente el calor proveniente del circuito de captación. Sin embargo, la temperatura máxima que limita el condensador, va a condicionar el sistema de distribución interior a seleccionar, ya que hay sistemas de distribución interior como son los radiadores de agua caliente, cuya temperatura de salida necesaria se sitúa en unos 70 °C [4], por lo que no serían válidos para la bomba de calor seleccionada.

En la Figura 3-19 se muestra el diagrama de Molliere Presión-entalpía para el refrigerante 407C, donde se pueden la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador.



**Figura 3-19** Ciclo para el refrigerante 407C ([2])

### 3.2.3 Circuito de distribución interior.

Como se ha mencionado en el anterior apartado, el sistema de radiadores de agua caliente existente actualmente en el “Almirante Francisco Moreno”, no es compatible con la bomba de calor seleccionada, puesto que habría que elevar la temperatura del agua a unos 70 °C aproximadamente, mientras que la bomba de calor seleccionada puede elevar como máximo 55 °C (si la bomba trabaja al 75 % de potencia) la temperatura del agua debido a las características del refrigerante de la bomba, ver Figura 3-19.

Por ello, hay que elegir un sistema de distribución interior compatible con esta bomba de calor, que para este trabajo se ha optado por el sistema de distribución por suelo radiante, ya que permite climatizar el edificio sin tener que elevar la temperatura más de lo permitido por la bomba de calor, además, funciona con agua, que es un requisito que debía de cumplir el sistema de distribución interior.

El suelo radiante es el más propicio ya que mantiene la temperatura interior de la zona a climatizar más constante que el resto de sistemas de distribución interior, por tanto, el sistema que más se aproxima a lo que sería lo ideal, tal y como se muestra en la Figura 3-20, además, es compatible con la bomba de calor seleccionada, ya que como se vio en el apartado 2.3.3.3, basta con calentar el agua que se hace circular por las tuberías a una temperatura de entre 40 y 50 °C, para mantener la temperatura de confort adecuada en invierno de unos 20 °C, y no superar la máxima, establecida en 29 °C [5].

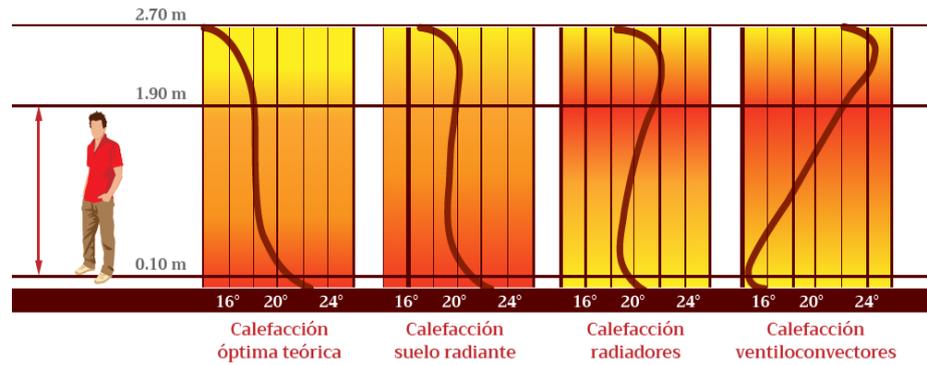


Figura 3-20 Distribución de calor de los distintos tipos de calefacción ( [17])

Otra gran ventaja que supone la instalación del suelo radiante, es la cantidad de espacio que se ahorrará, al poder retirar los radiadores de agua caliente existentes en el edificio, ya que, como ya se ha comentado, no son necesarios para este tipo de sistema de distribución.

De los tipos de distribución de los tubos para suelo radiante, se ha optado por la distribución en espiral al ser la distribución que ofrece una mayor uniformidad a la hora de distribuir el calor, como ya se explicó en el apartado 2.3.3.3.

El suelo radiante no es válido para la zona de aseos, por lo que en este trabajo, no se climatizarán los baños de las damas y caballeros alumnos, lo que deja una superficie total a cubrir por el suelo radiante de 3605,28 m<sup>2</sup>.

### 3.2.3.1 Componentes del suelo radiante

Para la instalación del suelo radiante, se ha comentado que el elemento principal encargado de distribuir todo el calor son las tuberías, sin embargo, existen otros elementos adicionales como los mostrados en la Figura 3-21 que son necesarios para la instalación del suelo radiante. A la hora de la selección y dimensionamiento de los elementos del suelo radiante, hay que tener en cuenta la norma UNE-EN 1264 [5], que establecen los requisitos que ha de cumplir el diseño del suelo radiante, en función de las necesidades térmicas del edificio.

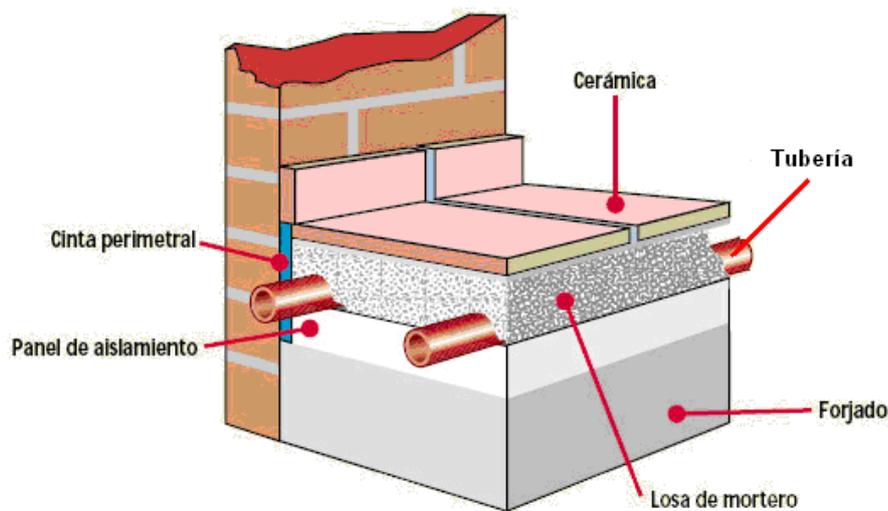


Figura 3-21 Componentes suelo radiante ( [13])

Las tuberías van colocadas sobre un panel de aislamiento, que a su vez este se apoya sobre un forjado de hormigón armado que separa la primera planta de la segunda planta del edificio. Sobre los paneles y

las tuberías, se coloca una losa de mortero, encargada de la difusión del calor. Ya sobre esta losa se coloca el pavimento que está en contacto directo con el ambiente interior del edificio.

Para la selección de materiales, se ha hecho uso de un manual técnico de instalación de suelo radiante proporcionado por la empresa UPONOR [17]. Los datos que se han tenido que introducir, son los siguientes:

Todos los materiales seleccionados cumplen con lo exigido por el por el CTE, y con la norma UNE-EN 1264 [5]. En el anexo III se muestra el certificado AENOR de los materiales seleccionados.

A continuación se describen los materiales necesarios para la instalación de suelo radiante de este trabajo, así como su función.

#### ➤ ***Banda perimetral***

Durante el funcionamiento del suelo radiante, se producen dilataciones del suelo, a causa de mortero de cemento situado sobre las tuberías, debido a las constantes variaciones de temperatura que se producen. Para absorber estas dilataciones, se introduce una cinta perimetral adhesiva por ambos lados, para su unión a la pared y al panel aislante, de un material espumoso, en este caso de polietileno, de la marca Uponor, como la que se muestra en la Figura 3-22.



**Figura 3-22 Banda perimetral ( [17])**

#### ➤ ***Panel de aislamiento***

La función del panel de aislamiento es actuar como guía de las tuberías y de aislante térmico, es decir, el calor que proporciona las tuberías, es cedido exclusivamente al interior del recinto a climatizar, sin que se ceda calor a las plantas inferiores. En este trabajo se ha seleccionado uno de poliestireno expandido (EPS) de 43 mm de espesor con recubrimiento plastificado de la empresa Uponor, con una resistencia térmica de 1,25 m<sup>2</sup>K/W como el mostrado en la Figura 3-23. Este panel permite mantener una separación constante entre los tubos de 225 mm, y mantener una temperatura uniforme en el suelo, cumpliendo con la norma UNE-EN 1264 [5].



Figura 3-23 Panel de aislamiento ( [17])

➤ **Pavimento**

El pavimento es un elemento fundamental dentro de la instalación de suelo radiante ya que es el encargado de ceder el calor al ambiente por radiación para que alcance la temperatura deseada, que según la norma UNE-EN 1264 [5], no debe superar los 29 °C.

El sistema de distribución por suelo radiante, es compatible con prácticamente todos los tipos de pavimentos existentes, aunque no todos ellos se comportan de la misma manera. Dependiendo de la conductividad térmica del material, permitirán mayor o menor transferencia de calor. En el caso de este trabajo, se aprovechará el pavimento ya existente en el edificio, el mármol, cuya conductividad térmica es de 1,83 W/m °C [26]. Este dato indica que el mármol es un gran conductor del calor, por lo que es una gran elección, no sólo para este tipo de instalación, también para cualquier instalación con suelo radiante. En la Tabla 3-7 se muestra la conductividad térmica de otros posibles materiales que se pueden emplear en suelo radiante.

| Material del pavimento | Conductividad térmica (W/m °C) |
|------------------------|--------------------------------|
| Mármol                 | 1,83                           |
| Baldosas de cerámica   | 1                              |
| Madera                 | 0,22                           |
| Linóleo                | 0,19                           |
| Goma/PVC               | 0,16                           |
| Alfombra o moqueta     | 0,05                           |

Tabla 3-7 Conductividad térmica distintos materiales ( [26])

➤ **Mortero**

Como ya se ha mencionado al comienzo de este apartado, sobre las tuberías se colocará una losa de mortero de 50 mm de espesor, el mínimo recomendado por la norma UNE-EN 1264 es 30 mm. Además de permitir la difusión del calor, evita la inclusión de aire. EL mortero seleccionado es el de la marca Uponor, un total de 390 kg de mezcla, formado por 95 kg de cemento, 265 kg de arena, 25 litros de agua de amasado y 0,30 kg de aditivo de Uponor.

➤ **Tuberías de distribución**

Las tuberías de distribución son las encargadas de hacer circular el agua proveniente de los acumuladores, calentada mediante la bomba de calor geotérmica, por todo el suelo del edificio. La temperatura del agua de los tubos, no superará los 50 °C, temperatura máxima permitida para que el pavimento no pueda alcanzar una temperatura superior a los 29 °C que estipula la norma UNE-EN 1264 [5]. Haciendo circular el agua entre 40 y 50 °C, la temperatura de la estancia permanecerá entre los 20 y 28 °C.

Para la selección de las tuberías del circuito de distribución por suelo radiante, se han tenido en cuenta los requisitos y recomendaciones de la norma UNE-EN 126-4 [5]. Uno de los requisitos es que el diámetro exterior de las tuberías esté comprendido entre 16 y 20 mm, y que entre ellas no haya una

separación mayor de 300 mm, separación que la norma recomienda para instalaciones de gran tamaño, como es el caso de este trabajo, por ello, el modelo de tubería seleccionado es el Uponor Comfort Pipe Plus 16 x 2 mm de la marca Uponor, es decir, un diámetro exterior de 16 mm y un espesor de pared de 2 mm. Este dato es importante, dado que la norma específica que el radio de curvatura no puede ser inferior a 5 veces el diámetro del tubo, es por ello por lo que previamente se seleccionó la distribución de tuberías en espiral.

Se trata de una tubería de polietileno reticulado (PEX-a) de alta densidad formada por 5 capas, que también cuenta con una capa de alcohol de vinilo etileno (EVAL) anti difusión de oxígeno, recomendado por la norma UNE-EN 126-4 [5], ya que evita que las partes metálicas de la instalación puedan oxidarse.

Para calcular la longitud necesaria de tubería en metros, hay que hacer el cociente entre la superficie total que se quiere climatizar, que, para esta instalación, es de 3605,28 m<sup>2</sup> entre las dos plantas, y la distancia de separación entre las tuberías de 225 mm (ya que es la separación que permite el panel de aislamiento seleccionado) [17].

$$L_{tubería} = \frac{\text{superficie}}{\text{separación}} = 16000 \text{ m}$$

**Ecuación 3-16**

### ➤ *Sistema de distribución*

Para distribuir por las tuberías el agua calentada por la bomba de calor, se hace uso de los denominados colectores de distribución. Esto permite que, a partir de un circuito principal, se pueda distribuir el agua en varios circuitos. Cada sistema de distribución dispone de un colector de impulsión del agua caliente del circuito, y otro colector de retorno del agua enfriada, cada uno de ellos equipados con una válvula de paso para controlar al caudal del agua que circula. Además, cada colector ha de tener el mismo número de salidas que de circuitos, tanto de retorno como de impulsión. Actualmente en el mercado, los hay disponibles de una a 12 salidas.

Debido a que la norma UNE-EN 1264 [5] no permite que cada circuito tenga más de 120 m de tubería, y tal y como se calculó en el anterior apartado, hay que instalar 16000 m de tubería para satisfacer las necesidades del edificio, se ha decidido dividir cada planta en 96 zonas, cada una de las cuales conforman un circuito de 83 m de longitud cada uno. Todos los circuitos son independientes entre sí, lo que supone una gran ventaja ya que se podrá climatizar de manera independiente cada una de las 96 zonas en las que se ha dividido cada planta (un circuito por habitación, un circuito por estudio, y el resto de circuitos repartidos entre los pasillos de las distintas alas y el hall central).

Cada planta ha de tener colectores completamente independientes entre sí [17], ya que no existen actualmente en el mercado colectores con mayor número de salidas, se ha decidido instalar 8 colectores por cada planta, con 12 salidas cada uno de ellos, para poder alimentar a cada uno de los circuitos. Los 8 colectores de cada planta van conectados a un circuito principal, por el cual circula el agua proveniente del depósito de inercia.

El modelo de colectores el Uponor Vario Plus colector kit caudalímetro de dos salidas 1”x3/4, al que se le incorporan otras diez salidas mediante un módulo básico colector de una salida. En la Figura 3-24 se muestra el sistema de colectores seleccionado.

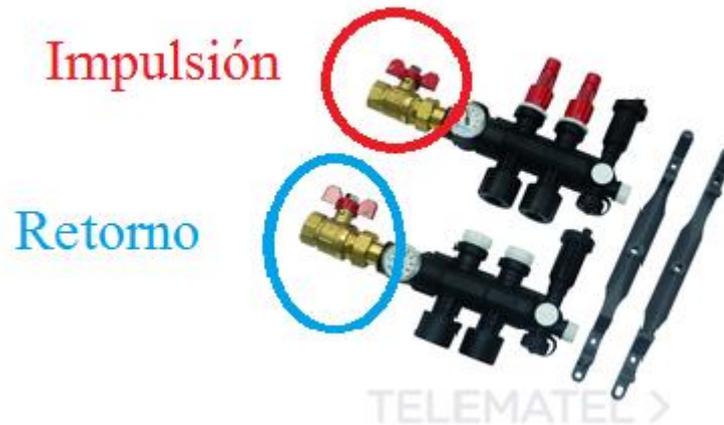


Figura 3-24 Sistema de colectores de dos salidas ([17])

Las especificaciones técnicas según el fabricante son las siguientes:

- Temperatura máxima de operación: 60 °C
- Presión máxima de trabajo: 6 bar
- Presión máxima de prueba: 10 bar (24h/30 °C)
- Materia de fabricación: poliamida
- Caudalímetro en el colector de impulsión.
- Incluye 2 válvulas de paso, 2 termómetros, dos purgadores automáticos y una llave de paso.

#### ➤ *Sistema de regulación*

Para la instalación propuesta en este trabajo se ha decidido incorporar un sistema de regulación básica, que permite regular la temperatura de cada circuito de manera independiente, lo que supone un gran ahorro, tanto económico como energético, ya que se podrán aislar las estancias que no estén habitadas. Para ello, en el colector de retorno de cada circuito se incorpora un cabezal electrónico del modelo Uponor Vario PLUS alimentado a 230 V, conectado mediante un cableado a un termostato Uponor, modelo “T”, alimentado a 230 V, mediante el cual, el usuario seleccionará la temperatura deseada, para los meses de invierno la temperatura de confort se establece en 20 °C según [5]. Ambos mostrados en la Figura 3-25 y la Figura 3-26 respectivamente.



Figura 3-25 Cabezal electrónico ([17])



Figura 3-26 Termostato T23 ([17])

➤ **Grupo hidráulico de impulsión**

El grupo hidráulico es un elemento fundamental en la instalación de suelo radiante, ya que es el encargado de impulsar el agua del depósito de inercia hasta los colectores mediante una bomba de impulsión electrónica, para la instalación de este trabajo se aprovecharán las bombas de impulsión ya existentes, de la gama BT-65, capaces de impulsar el agua a un caudal máximo de 5,45 m<sup>3</sup>/h, válidas para el circuito de distribución elegido. El circuito de calefacción está dividido en dos partes, la primera planta del edificio, y la segunda planta, por lo que cada una de las bombas impulsará el agua a sus respectivos circuitos. También existe una tercera bomba de impulsión, encargada de destinar parte del agua calentada por la bomba de calor a un circuito que, a través de un intercambiador de calor, calentará el agua del circuito de ACS.

➤ **Depósito de inercia**

Para cubrir la demanda del edificio de calefacción y ACS, la instalación ha de contar con un depósito de inercia, que ha tener la suficiente capacidad como para poder enviar el agua al circuito de distribución del suelo radiante, y al circuito que calentará el agua procedente de los acumuladores de ACS a través de un intercambiador de calor. El volumen del depósito de inercia también ha de adecuarse lo máximo posible a las características de la instalación, para así evitar posible un excesivo número de arranques y paradas de la bomba de calor.

El volumen del depósito se calcula teniendo en cuenta que por cada kW de potencia requerida, se necesitan 25 litros de volumen [17], por lo que para la instalación de este edificio, que requiere una potencia de 201 kW, se obtiene un volumen de 5025 litros. Se seleccionará un depósito de 6000 litros, de esta forma no será necesario diseñar un depósito de expansión. Para esta instalación, se ha seleccionado el depósito de inercia Valinox, serie PF-INERCIA, gama CLOTH, de 6000 litros de capacidad, fabricado en chapa de acero carbono S235-JR, y aislado con una capa de 50 mm de poliuretano flexible, con un diámetro exterior de 1,8 m y una altura de 2,4 m. La temperatura en el interior de este depósito de mantendrá en 50 °C, ya que es la temperatura máxima a la que puede calentar la bomba de calor seleccionada, a esta temperatura se distribuirá el agua por el circuito del suelo radiante, así como al intercambiador de calor con el circuito de ACS. En la Figura 3-27 muestra el depósito de inercia seleccionado.



**Figura 3-27 Depósito de inercia seleccionado ( [27])**

### *3.2.4 Acumuladores de ACS*

Como ya se comentó en el apartado 3.1.2, la Escuela Naval ya cuenta con acumuladores de ACS de 3000 litros cada uno, suficientes para abastecer la demanda del edificio.

Si se quisiera diseñar un depósito exclusivo para la instalación propuesta, habría que tener en cuenta el consumo diario de ACS del edificio, obtenido en el apartado 3.1.3.1, siguiendo los requisitos establecidos el apartado HE 4 del CTE [9]. El consumo diario para el cuartel en su máxima ocupación se estimó en 19360 litros de agua potable a 60 °C, por lo que el depósito a diseñar ha de tener por lo menos, ese mismo volumen, más un incremento de aproximadamente un 20% para el consumo de agua potable sin calentar, como es por ejemplo el uso de lavabos y cisternas. A pesar de que el volumen de los acumuladores actuales es mucho menor, estos se abastecen continuamente del agua procedente de los depósitos de agua con los que cuenta la Escuela Naval Militar, mencionados en el apartado 3.1.2, por lo que serían válidos para la instalación propuesta en este trabajo, con la única diferencia de que el agua se acumulará a una temperatura de unos 45-50 °C por limitaciones de la bomba de calor seleccionada. El circuito de ACS, ya cuenta con un vaso de expansión, al no cambiar el diseño de este circuito, no hará falta diseñar uno nuevo.

### *3.2.5 Esquema de la instalación.*

A continuación, en la Figura 3-28, se muestra un esquema simplificado de cómo irían dispuestos los distintos componentes de la nueva instalación.

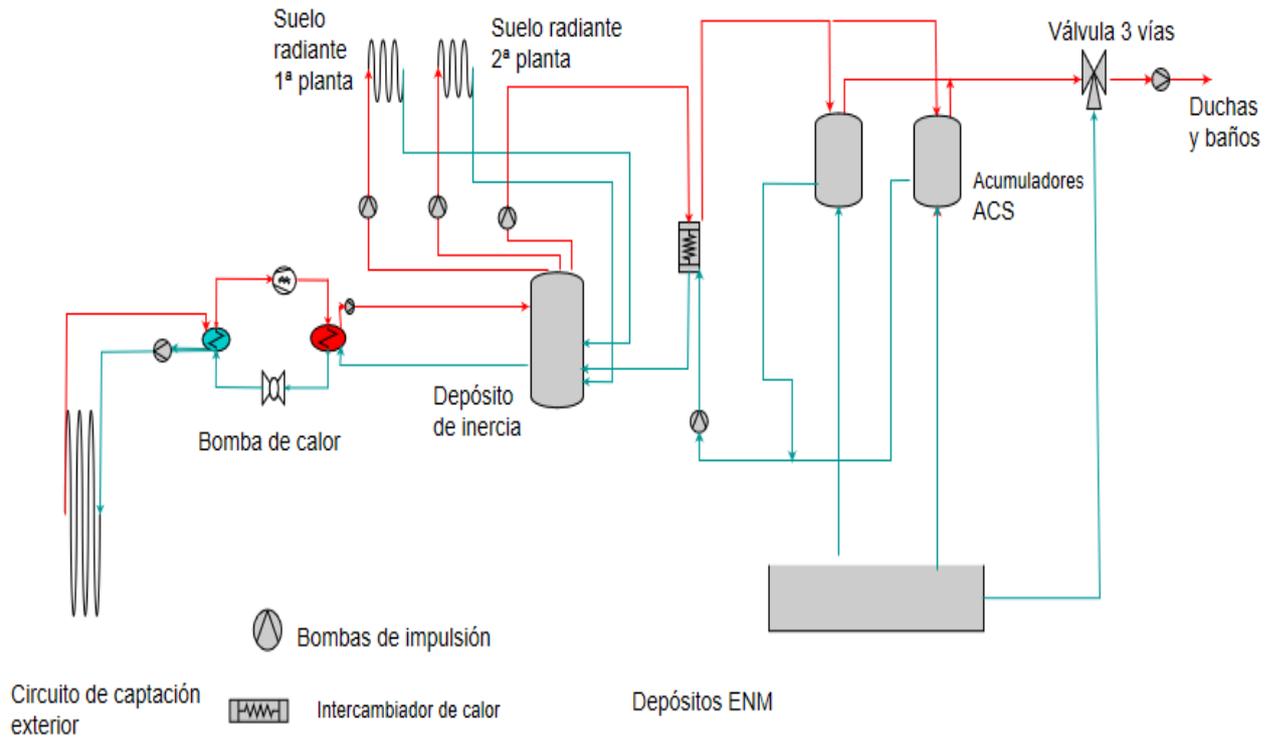


Figura 3-28 Esquema instalación final

## 4 IMPACTO ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL

### 4.1 Presupuestos e impacto económico

A continuación, se detallan los presupuestos generales de la instalación a realizar, indicando por una parte los presupuestos de la instalación geotérmica, y por otra parte los presupuestos del sistema de distribución por suelo radiante. Posteriormente, se calculará el ahorro anual que supone la nueva instalación y el tiempo en recuperar la inversión inicial realiza.

#### 4.1.1 Instalación geotérmica

| Descripción de material   | Unidades | Precio por unidad (€) | Precio total (€) |
|---|----------|-----------------------|------------------|
| Bomba de calor DS6500-R407C WATERKOTTE (221kW) (incluida la instalación y transporte)   | 1        | 67.166                | 67.166           |
| Perforación para la instalación geotérmica  | 16       | 4.000                 | 64.000           |
| Sonda geotérmica PE100 RC con certificado SKZ (incluye tubo de inyección PE100 de 25 mm y lastres de 60 kg), incluido transporte y pruebas de presión y circulación de acuerdo a UNE 100715-1 | 16       | 530                   | 8.480            |
| Fluido anticongelante (70% agua, 30% propilenglicol) (litros)   | 6.650,6  | 1,65                  | 11.073,25        |
| Vaso de expansión Salvador Escoda (80 litros)   | 1        | 105,5                 | 105,5            |
|   |          |                       | 150.824,7        |

**Tabla 4-1 Presupuesto instalación geotérmica**

El precio del transporte de materiales, instalación de la bomba de calor, conexión de esta con el circuito de captación, y realización de las perforaciones, se ha consultado a distintas empresas, que han dado un precio aproximado. En el precio de cada perforación, va incluido lo siguiente:

- Transporte, montaje, desmontaje y retirada de equipo completo para la perforación, inyección y colocación de sondas geotérmicas, incluido transporte de materiales y parte proporcional de transporte de personal especializado.

- Perforación con máquina dotada de doble cabezal con diámetro 164 mm, hasta 150 m de profundidad para la instalación de la sonda geotérmica y la inyección del mortero.
- Suministro del mortero geotérmico seleccionado.

Desde que en 2014 la Asociación Cluster de Xeotermia Galega (ACLUCEGA) anunció subvenciones a nivel estatal y autonómico para este tipo de instalaciones, la Xunta de Galicia las realiza con el fin de mejorar la eficiencia energética con la instalación de bombas de calor para el desarrollo de la energía geotérmica en la Comunidad Autónoma de Galicia.

Ese mismo año, el plan entró en vigor, y a partir de ese momento, se subvencionan todas las bombas de calor cuyo COP sea superior a 3,9 en calefacción, incluidas las geotérmicas, tal y como dice el artículo 5 de la resolución del INEGA en el Diario Oficial de Galicia (DOG) [28]. En el caso de la instalación propuesta en este trabajo, la bomba de calor elegida tiene un COP de 4,2. Según el artículo 6 de este decreto, la subvención sería del 30% del coste de la nueva instalación (excluyendo el sistema de distribución de calor interior), siempre y cuando esta ayuda no sea superior a los 200.000 €.

Como la instalación propuesta en este trabajo cumple con los requisitos para recibir la subvención, se tendrá en cuenta a la hora de realizar los presupuestos, por lo que aplicándole el 30% de subvención al precio de la instalación geotérmica sin incluir el I.V.A., quedará un precio total de 105.577,3 €.

#### 4.1.2 Suelo radiante

| Descripción de material  | Unidades | Precio por unidad (€) | Precio total (€) |
|--|----------|-----------------------|------------------|
| Depósito de inercia PF-Valinox 6.000 litros                              | 1        | 5.150,00              | 5.150,00         |
| Uponor Comfort Pipe PLUS 16X2 mm (m)                                     | 16.000   | 1,85                  | 29.600,00        |
| Uponor Multiautofijación zócalo perimetral 150x10 mm (50m)               | 3.650    | 1,99                  | 7.263,50         |
| Uponor Comfort Nubos IB 150 1350x750x43 (m <sup>2</sup> )                | 3.605    | 18,85                 | 67.954,25        |
| Uponor Multiaditivo para mortero (kg)                                    | 390      | 8,90                  | 3.471,00         |
| Uponor Fix curvatubos plástico 16-17 mm                                  | 384      | 2,07                  | 794,88           |
| Uponor Vario Plus módulo básico colector caudalímetro 2 salidas 1" x 3/4 | 16       | 229,05                | 3.664,80         |
| Uponor vario Plus módulo básico colector caudalímetro 1 salida 1" x 3/4  | 160      | 50,39                 | 8.062,40         |
| Uponor Vario Plus adaptador 16x2,0/1,8 mm                                | 384      | 5,00                  | 1.920,00         |
| Uponor Vario caja colectores 12 salidas CI 80x1000 mm                    | 16       | 113,00                | 1.808,00         |
| Uponor Vario tapa colectores CI con llave 1000 mm                        | 16       | 97,00                 | 1.552,00         |
| Uponor Vario Plus cabezal electrotérmico 220 V                           | 192      | 49,85                 | 9.571,20         |
| Uponor termostato 230 V cableado T23                                     | 192      | 36,65                 | 7.036,80         |
|  |          |                       | 147.848,83       |

**Tabla 4-2 Presupuesto suelo radiante**

El precio de mano de obra y transporte de materiales consultado a distintas empresas para el suelo radiante se estima en un total de 15.000 €.

#### 4.1.3 Presupuesto general

Presupuesto ejecución de material (PEM ...268.426,15 €

Presupuesto de licitación (PL).....319.427,1 €

- Gastos generales (13%).....34.895,4 €
- Beneficio industrial (6%).....16.105,5€

**Presupuesto total de obras= PL + IVA (21%).....386.506 €**

El presupuesto total de la obra será la cantidad de TRESCIENTOS OCHENTA Y SEIS MIL QUINIENTOS SEIS EUROS.

#### 4.1.4 Tiempo de retorno de la inversión inicial

Uno de los objetivos principales que se quiere obtener con la implantación de la instalación de este trabajo, es que esta suponga un ahorro económico a largo plazo, por lo que se realizará un análisis comparativo sobre el gasto anual que supone esta nueva instalación en comparación con la actual, y en base a la inversión realizada, se indicará el tiempo que tendrá que pasar para que la instalación comience a ser rentable económicamente.

El dato que se empleará como demanda anual del “*Almirante Francisco Moreno*” entre calefacción y ACS es la demanda obtenida en el apartado 3.1.3, es decir, 467,88 MWh/año.

La bomba de calor seleccionada para la nueva instalación tiene un COP de 4,2, es decir, la energía eléctrica que ha de suministrar anualmente para proporcionar la potencia anual consumida por el edificio, será el cociente entre la potencia anual consumida, y el COP de la bomba de calor, lo que da un valor de 111.400 kWh/año eléctricos, mientras que el resto de la demanda se abastece por medio del calor extraído de la tierra, lo que no supone ningún gasto económico.

Por lo tanto, el único gasto energético que supone el empleo de la instalación geotérmica es el de la energía eléctrica, 111.400 kWh al año. Actualmente, el precio del kWh eléctrico para la Escuela Naval Militar es de 0,1674 €/kWh (sin IVA), con una tasa de aumento anual del 3%, dato obtenido a través de la empresa *ENDESA* (geotermia), para instalaciones geotérmicas. Esta instalación no requiere de mantenimiento por lo que también supondrá un ahorro anual en este sentido.

- Gasto anual (IVA incluido)=  $(111.400 \times 0,1674) + (111.400 \times 0,1674) \times 0,21 = 22.564,5$  €/año

Empleando la instalación actual del cuartel “*Almirante Francisco Moreno*”, se calcula el gasto anual teniendo en cuenta que toda la demanda del edificio se suministra mediante el consumo de gas natural, por lo que teniendo en cuenta el rendimiento de la instalación, que como se dijo en el apartado 3.1.2, es del 91% , la que la energía facturable será de 514.150 kWh, el precio actual del gas natural para la Escuela Naval Militar es de 0,062 €/kWh (sin IVA), con un incremento anual del 2% para la empresa que tiene contratada la Escuela Naval Militar, *Gas Natural Fenosa*, además de 90 € anuales de mantenimiento que requiere esta instalación. Por otro lado, la empresa cobra a la Escuela Naval Militar 0,144 €/día por tener contratado el gas natural, y 0,042 €/día por el alquiler del contador, lo que supone al año un gasto de 67,89 €.

- Gasto Anual (IVA incluido)=  $(514.150 \times 0,062 + 90 + 67,89) + (514.150 \times 0,062 + 90 + 67,89) \times 0,21 = 38.762,86$  €/año

En la Tabla 4-3, se muestra una comparación entre el gasto anual que supone cada una de las instalaciones a comparar, teniendo en cuenta la inversión inicial realizada para la instalación geotérmica de este trabajo y el incremento anual del gas natural y de la electricidad. De esta manera, haciendo una

ESTUDIO DE IMPLANTACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR  
GEOTÉRMICA EN EL CUARTEL ALMIRANTE FRANCISCO MORENO DE LA ESCUELA NAVAL  
MILITAR

comparativa, se podrá ver los años necesarios para que la instalación sea rentable, teniendo en cuenta el IVA.

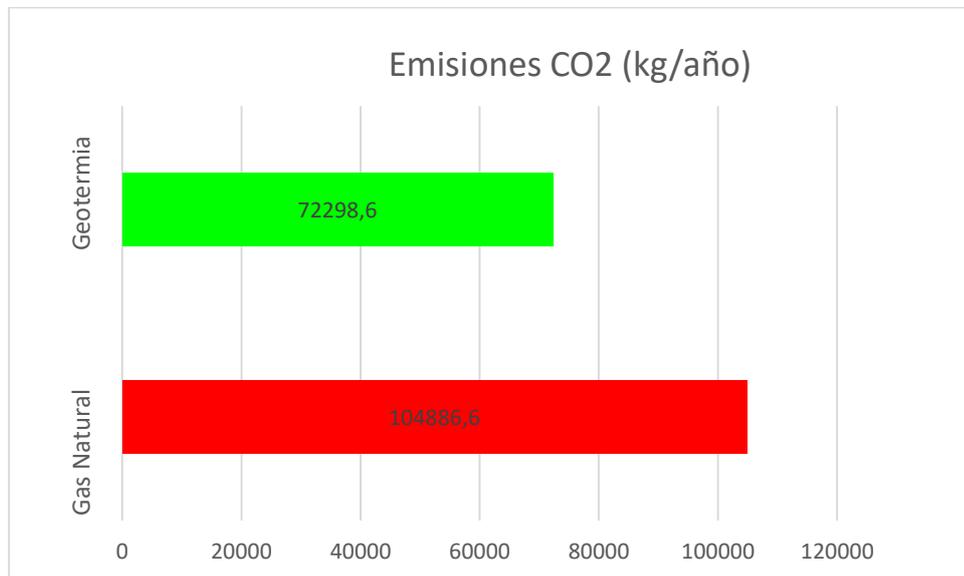
|                   | Geotermia              | Gas natural            | Gas Natural                        |              |                                     |                                       |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Inversión inicial | 386.506,00 €           | -                      |                                    |              |                                     |                                       |
| Año               | Coste anual energético | Coste anual energético | Coste mantenimiento y costes fijos | Ahorro anual | Coste anual total nueva instalación | Coste anual total antigua instalación |
| 0                 |                        |                        |                                    |              | 386.506,00 €                        | - €                                   |
| 1                 | 22.564,51 €            | 38.571,82 €            | 191,05 €                           | 15.816,26 €  | 409.070,51 €                        | 38.762,86 €                           |
| 2                 | 23.241,45 €            | 39.343,25 €            | 191,05 €                           | 15.910,76 €  | 432.311,96 €                        | 78.297,17 €                           |
| 3                 | 23.706,27 €            | 40.130,12 €            | 191,05 €                           | 16.232,80 €  | 456.018,23 €                        | 118.427,29 €                          |
| 4                 | 24.180,40 €            | 40.932,72 €            | 191,05 €                           | 16.561,28 €  | 480.198,63 €                        | 159.551,05 €                          |
| 5                 | 24.664,01 €            | 41.751,38 €            | 191,05 €                           | 16.896,32 €  | 504.862,64 €                        | 201.493,48 €                          |
| 6                 | 25.157,29 €            | 42.586,40 €            | 191,05 €                           | 17.238,07 €  | 530.019,92 €                        | 244.270,93 €                          |
| 7                 | 25.660,43 €            | 43.438,13 €            | 191,05 €                           | 17.586,65 €  | 555.680,36 €                        | 287.900,11 €                          |
| 8                 | 26.173,64 €            | 44.306,89 €            | 191,05 €                           | 17.942,21 €  | 581.854,00 €                        | 332.398,05 €                          |
| 9                 | 26.697,12 €            | 45.193,03 €            | 191,05 €                           | 18.304,87 €  | 608.551,12 €                        | 377.782,13 €                          |
| 10                | 27.231,06 €            | 46.096,89 €            | 191,05 €                           | 18.674,79 €  | 635.782,17 €                        | 424.070,07 €                          |
| 11                | 27.775,68 €            | 47.018,83 €            | 191,05 €                           | 19.052,11 €  | 663.557,85 €                        | 471.279,95 €                          |
| 12                | 28.331,19 €            | 47.959,21 €            | 191,05 €                           | 19.436,97 €  | 691.889,04 €                        | 519.430,20 €                          |
| 13                | 28.897,82 €            | 48.918,39 €            | 191,05 €                           | 19.829,53 €  | 720.786,86 €                        | 568.539,64 €                          |
| 14                | 29.475,77 €            | 49.896,76 €            | 191,05 €                           | 20.229,94 €  | 750.262,63 €                        | 618.627,45 €                          |
| 15                | 30.065,29 €            | 50.894,69 €            | 191,05 €                           | 20.638,36 €  | 780.327,92 €                        | 669.713,19 €                          |
| 16                | 30.666,59 €            | 51.912,59 €            | 191,05 €                           | 21.054,95 €  | 810.994,51 €                        | 721.816,82 €                          |
| 17                | 31.279,93 €            | 52.950,84 €            | 191,05 €                           | 21.479,87 €  | 842.274,44 €                        | 774.958,71 €                          |
| 18                | 31.905,52 €            | 54.009,86 €            | 191,05 €                           | 21.913,29 €  | 874.179,96 €                        | 829.159,62 €                          |
| 19                | 32.543,63 €            | 55.090,05 €            | 191,05 €                           | 22.355,37 €  | 906.723,60 €                        | 884.440,72 €                          |
| 20                | 33.194,51 €            | 56.191,86 €            | 191,05 €                           | 22.806,30 €  | 939.918,10 €                        | 940.823,62 €                          |
| 21                | 33.858,40 €            | 57.315,69 €            | 191,05 €                           | 23.266,25 €  | 973.776,50 €                        | 998.330,36 €                          |
| 22                | 34.535,57 €            | 58.462,01 €            | 191,05 €                           | 23.735,39 €  | 1.008.312,07 €                      | 1.056.983,41 €                        |

**Tabla 4-3**

En el gráfico que muestra la Figura 4-1, se muestran los datos de la tabla anterior, donde se puede ver la evolución de los costes de cada una de las instalaciones de los próximos 22 años:

$$masa_{CO_2}(kg) = 111.400(kwh) \times 0,649 = 72.298,6 \text{ kg/año}$$

Representado gráficamente:



**Figura 4-2 Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub>**

Como se puede comprobar en el gráfico de la Figura 4-2, la instalación geotérmica propuesta implica un considerable decremento de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que se traduce en una importante reducción al impacto medioambiental, lo que era uno de los principales objetivos de este trabajo.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Se puede decir que el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado se ha cumplido con éxito, puesto que, con las previsiones de este estudio, se consiguen reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la instalación de climatización y producción de ACS de el “*Almirante Francisco Moreno*” considerablemente, ya que ha sido posible la implantación de la bomba de calor geotérmica, además, a pesar de la elevada inversión inicial, el gasto anual que implica la instalación propuesta es mucho menor que el que supone la actual, haciendo que a partir de los 20 años de funcionamiento, esta elevada inversión se recupere, y solo suponga ganancias a partir de ese momento.

Gracias a los datos sobre el consumo energético en climatización y producción de ACS del “*Almirante Francisco Moreno*”, se ha podido dimensionar de forma aproximada cada una de las partes de la instalación geotérmica. No se ha podido realizar de forma tan precisa al no disponer de los medios suficientes para realizar un exhaustivo análisis del subsuelo mediante el Test de Respuesta Geotérmico, ya que el subsuelo es la principal fuente de energía de la instalación propuesta. Aun así, gracias al mapa geológico nacional proporcionado por el IGME, e información obtenida por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), se ha podido dimensionar el sistema de captación de calor de la instalación, empleando la normativa vigente en Europa, ya que España no cuenta con una normativa específica para instalaciones geotérmicas. A pesar de los problemas encontrados, las conclusiones son positivas, ya que, al haber sido necesario estudiar los distintos métodos de dimensionamiento y análisis del terreno, los conocimientos adquiridos son mucho más amplios.

Otro problema al que se ha tenido que hacer frente, es la incompatibilidad de la bomba de calor geotérmica seleccionada con el sistema de radiadores de agua caliente que actualmente emplea el edificio, es por ello que se decidió implantar un suelo radiante en todo el edificio, explicando y dimensionando de manera aproximada cada uno de los elementos que lo componen. Sin embargo, gracias a esto, se han ampliado conocimientos, se ha podido ver que es un sistema que presenta muchas ventajas con respecto al resto, y que aunque su uso aún no está muy difundido, el haberlo empleado en este trabajo puede servir para darlo a conocer, y que pueda de ser considerado para futuras reformas en cualquier otro edificio de la Escuela Naval Militar.

También se puede considerar como objetivos cumplidos los siguientes:

- Se ha dado a conocer el funcionamiento de una bomba de calor y sus diferentes tipos, así como la función de cada uno de sus componentes.

- Se ha explicado lo que es la energía geotérmica, muy desconocida en España actualmente, sus distintos usos en todo el mundo, así como el funcionamiento de los distintos tipos de instalaciones geotérmicas existentes.
- Se han afianzado más conocimientos sobre el uso del programa SIEMENS NX.
- Gracias al estudio comparativo económico y medioambiental realizado, ha quedado demostrado las grandes ventajas que supone el empleo de fuentes de energías renovables.

## 5.2 Líneas futuras

Debido a los resultados obtenidos durante este Trabajo de Fin de Grado, se propone llevar a cabo el proyecto real de la instalación propuesta en este trabajo, realizando su correspondiente pliego de condiciones, y distintos estudios que no han podido llevarse a cabo, como es el Test de Respuesta Geotérmico.

Por otra parte, dado que la Escuela Naval cuenta con más edificios análogos al de este trabajo, como es el cuartel de alumnos "*Marqués de la Victoria*", se propone para futuros Trabajos de Fin de Grado realizar también un estudio sobre la posibilidad de implantar una bomba de calor geotérmica en los distintos edificios de la Escuela Naval Militar, de esta forma, aunque a largo plazo, se ahorrarán importantes cantidades de dinero, además de la importante contribución al medioambiente que esto supondría si se acabasen llevando a cabo las obras.

También se propone, el diseño de una normativa específica para instalaciones geotérmicas en España, ya que actualmente no existen, de esta forma, se fomentaría el empleo de este tipo de instalaciones para edificios de nueva construcción.

A pesar de que la instalación geotérmica supone un enorme ahorro económico y una gran reducción del impacto medioambiental, es necesario un cierto consumo eléctrico mediante el compresor de la bomba de calor, que sí que supone un gasto económico y es perjudicial para el medioambiente, por lo que para futuros Trabajos de Fin de Grado se plantea la posibilidad de realizar estudios sobre la implantación de otras instalaciones de climatización, que empleen otras fuentes de energía renovables como es la energía solar, mediante el uso de placas solares.

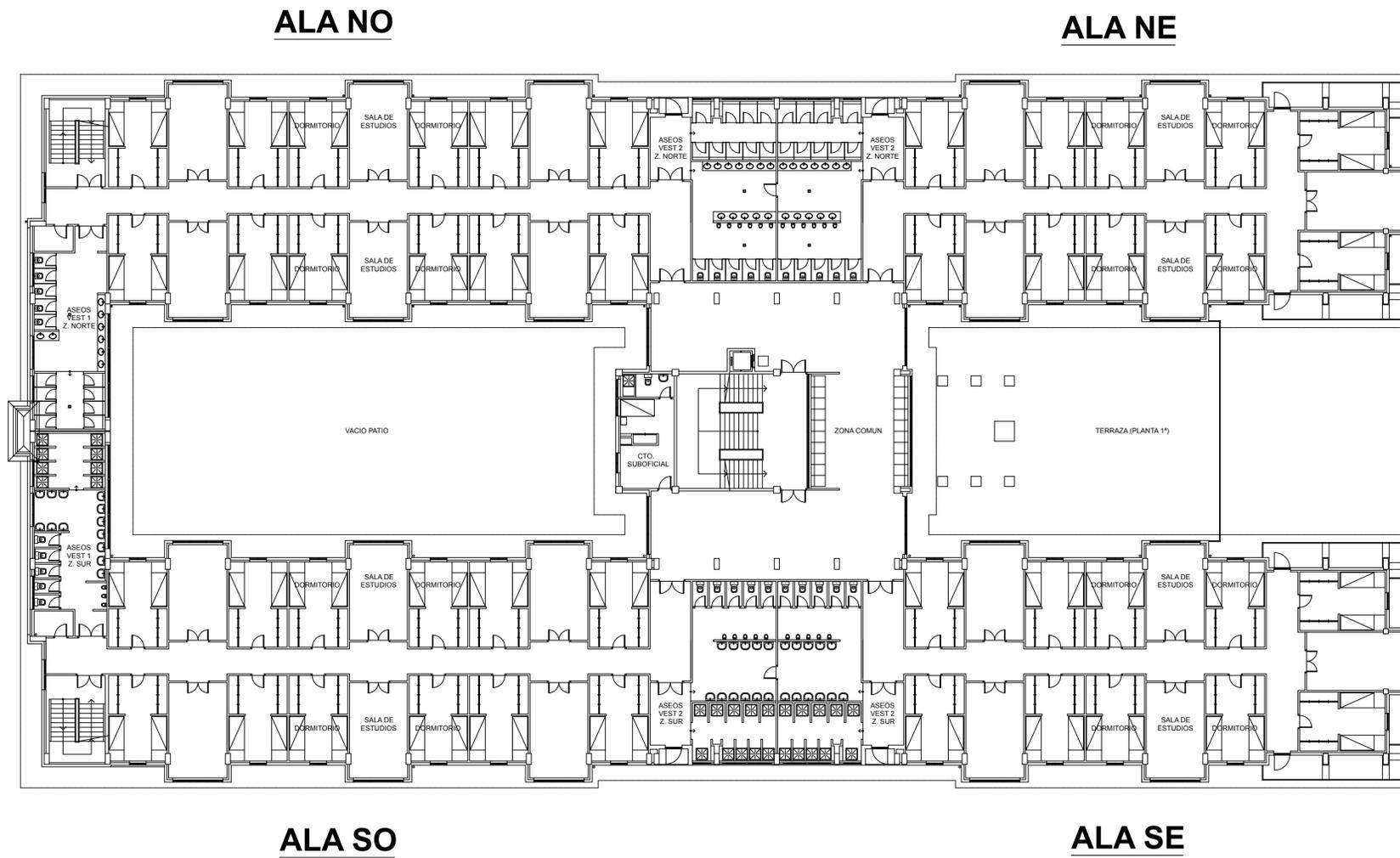
## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. J. Martínez, Bombas de Calor y Energías Renovables en Edificios, THOMSON, 2006.
- [2] E. Conde, A. Ramos, P. Reina y A. Vega, Guía Técnica de bombas de calor geotérmica, Madrid: Comunidad de Madrid, 2009.
- [3] REPSOL, «Repsol,» Repsol, 13 Noviembre 2015. [En línea]. Available: [https://www.repsol.com/es\\_es/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/](https://www.repsol.com/es_es/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/). [Último acceso: 18 Enero 2017].
- [4] A.Boles, Yunes y Michael, Termodinámica, Mc Graw Hill, 2011.
- [5] Norma UNE-EN 1264, «Sistemas de calefacción y refrigeración por circulación de agua en superficies,» AENOR, 2013.
- [6] G. Trillo y C. López, Guía técnica de sondeos geotérmicos y superficiales, Madrid: Comunidad de Madrid, 2009.
- [7] J. Martínez, Geotermia, Unión Española de Geotermia, 2013.
- [8] J. Piñeiro, «Certificación energética del Cuartel "Almirante Francisco Moreno",» Pontevedra, 2015.
- [9] Ministerio de vivienda, «Documento Básico HE Ahorro de energía,» CTE, 2006.
- [10] Norma VDI 4640, «Termal use of the underground,» Verein Deutscher Ingenieure, DÜSSELDORF, 2001.
- [11] ASHARE, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1995.
- [12] S. Álvarez, *Instalación geotérmica de climatización y ACS para una vivienda unifamiliar*, Vigo.
- [13] ARGADI INGENIEROS, «Geotermia I,» 2010. [En línea]. Available: <http://energiarenovablegeotermica.blogspot.com.es/>. [Último acceso: 15 Enero 2017].
- [14] AEMET, «Agencia Estatal de Meteorología,» [En línea]. Available: <http://www.aemet.es>. [Último acceso: 21 Enero 2017].

- [15] A. García, Ahorro de energía, aprovechamiento de la energía geotérmica en las instalaciones de climatización, Córdoba: CIATESA, 2004.
- [16] I. Elousa, *Climatización de una vivienda con energía geotérmica*.
- [17] Uponor, Manual técnico suelo radiante, Madrid, 2014.
- [18] IGME, «Instituto Geológico y Minero de España,» 1 Diciembre 2000. [En línea]. Available: <http://www.igme.es/default.asp>. [Último acceso: 25 Enero 2017].
- [19] IGSHA, International ground source heat pump association, Oklahoma, 1988.
- [20] Norma UNE 100155:2004, «Instalaciones térmicas en edificios,» AENOR, 2004.
- [21] RITE, «Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios,» Consejo de Ministros, 2007.
- [22] E. Carnicer, Calefacción: Cálculo y diseño de las instalaciones, Madrid: Thomson, 2003.
- [23] Salvador Escoda, S.A., *Catálogo técnico vasos de expansión*, Barcelona.
- [24] WATERKOTTE, «Energía geotérmica para climatización eficiente,» GEODA sostenibilidad, 2014. [En línea]. Available: <http://waterkotte.com.es/>. [Último acceso: 4 Febrero 2017].
- [25] *Instituto Nacional de Meteorología*, 2015.
- [26] «Lurbero suelo radiante integral,» Orkli, [En línea]. Available: [www.orkli.com](http://www.orkli.com). [Último acceso: 11 Febrero 2017].
- [27] Valinox, «Valinox bien estar,» [En línea]. Available: <http://www.depositosvalinox.com/>. [Último acceso: 30 Febrero 2017].
- [28] Instituto energético de Galicia, «Subvenciones a proyectos de ahorro de eficiencia energética en la industria y servicios,» Xunta de Galicia, 2014.
- [29] IDAE, «Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER,» Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2009.
- [30] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Comentarios al RITE, IDAE, 2007.
- [31] Ó. R. Rivera, Eficiencia energética, Madrid: Fundación laboral de la construcción, 2014.
- [32] P. Manning, «Distribución de calor/frío en los edificios,» 19 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.docplayer.es>. [Último acceso: 16 Enero 2017].
- [33] J. D. Isabel, Guía Técnica sobre Pilotes Geotérmicos, Madrid: Comunidad de Madrid, 2009.



## **ANEXO II: PLANO PLANTAS A CLIMATIZAR**



|          |           |             |  |   |    |   |                |
|----------|-----------|-------------|--|---|----|---|----------------|
| Dibujado | Dibujado  | Nombre      | Planos cuartel "Almirante Francisco Moreno"          |   |    |   | <b>CUD-ENM</b> |
| Comprob. |           |             | Grupo  | 1 | Nº | 1 |                |
| Escala   | Formato   | Designación | VISTA EN PLANTA CUARTEL "ALMIRANTE FRANCISCO MORENO" |   |    |   | Lámina         |
| 1:200    | <b>A1</b> |             |  |   |    |   | Nº 1           |



## **ANEXO III: CERTIFICADO AENOR MATERIALES SUELO RADIANTE**



**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO Nº 001 / 005149**  
AENOR PRODUCT CERTIFICATE Nº

Pg. 1/2  
2012-05-18

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) certifica que el producto  
The Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR) certifies that the product

**TUBOS DE POLIETILENO RETICULADO (PE-X), POR EL MÉTODO DEL PERÓXIDO,  
PARA INSTALACIONES DE AGUA CALIENTE Y FRÍA**

**CROSSLINKED POLYETHYLENE (PE-X) PIPES, BY PEROXIDE METHOD, FOR HOT AND COLD  
WATER INSTALLATIONS**

detallado en la(s) página(s) siguiente(s), detailed in the following page(s),  
suministrado por supplied by

**UPONOR HISPANIA, S.A.U.**  
**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

y elaborado en and manufactured in

**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

es conforme con complies with

**UNE-EN ISO 15875-1:2004**  
**UNE-EN ISO 15875-1:2004/A1:2007**  
**UNE-EN ISO 15875-2:2004**  
**UNE-EN ISO 15875-2:2004/A1:2007**

Para conceder este Certificado, AENOR ha ensayado el producto y ha comprobado el sistema de la calidad aplicado para su elaboración. AENOR realiza estas actividades periódicamente mientras el Certificado no haya sido anulado, según se establece en el Reglamento Particular RP 01.52.

In order to grant this Certificate, AENOR has tested the product and has verified the quality system used in its manufacture. AENOR performs these tasks periodically while the Certificate has not been cancelled, in accordance with the stipulations of the Specific Rules RP 01.52.

Fecha de concesión: **2010-02-18**  
First issued on:

Fecha de renovación: **2012-05-18**  
Renewed on:

Fecha de caducidad: **2017-05-18**  
Expires on:

**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación  
**Avelino BRITO MARQUINA**  
Director General de AENOR  
Chief Executive Officer

No está autorizada la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83

**Entidad de certificación de producto acreditada por ENAC con nº C-PR002.01**  
**Product certification body accredited by ENAC, number C-PR002.01**



**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO N° 001 / 005149**  
AENOR PRODUCT CERTIFICATE N°

Pg. 2/2  
2012-05-18

MARCA COMERCIAL: UPONOR PEX  
TRADEMARK:

| SERIE | DIÁMETROS (mm)                                   | CLASE DE APLICACIÓN / PRESIÓN DE DISEÑO (bar) | OPACIDAD |
|-------|--|---|----------|
| SERIE | DIAMETERS (mm)                                   | APPLICATION CLASS / DESIGN PRESSURE (bar)     | OPACITY  |
| 2,6   | 12 - 15  | 1/10 ; 2/10 ; 4/10 ; 5/10                     | NO       |
| 3,1   | 28   | 1/10 ; 2/10 ; 4/10 ; 5/10                     | NO       |
| 3,2   | 12 - 16 - 18 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63       | 1/10 ; 2/10 ; 4/10 ; 5/10                     | NO       |
| 3,3   | 22   | 1/10 ; 2/10 ; 4/10 ; 5/8                      | NO       |
| 3,5   | 16   | 1/10 ; 2/10 ; 4/10 ; 5/8                      | NO       |
| 3,8   | 17   | 1/10 ; 2/8 ; 4/10 ; 5/8                       | NO       |
| 4,0   | 16   | 1/8 ; 2/8 ; 4/10 ; 5/8                        | NO       |
| 4,5   | 20   | 1/8 ; 2/8 ; 4/8 ; 5/8                         | NO       |
| 5,0   | 16 - 20 - 25 - 32 - 40 - 50 - 63 - 75 - 90 - 110 | 1/6 ; 2/6 ; 4/8 ; 5/8                         | NO       |

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

No está autorizada la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83

Entidad de certificación de producto acreditada por ENAC con n° C-PR002.01  
Product certification body accredited by ENAC, number C-PR002.01



**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO N° 001 / 006039**  
AENOR PRODUCT CERTIFICATE N°

Pg. 1/2  
2014-02-03

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) certifica que el producto  
The Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR) certifies that the product

**SISTEMAS DE SUELO RADIANTE**

**FLOORING HEATING SYSTEMS**

detallado en la(s) página(s) siguiente(s),

detailed in the following page(s),

suministrado por

supplied by

**UPONOR HISPANIA, S.A.U.**  
**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

y elaborado en

and manufactured in

**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

es conforme con

complies with

**UNE-EN 1264-1:1998 (EN 1264-1:1997)**  
**UNE-EN 1264-2:2009 (EN 1264-2:2008)**  
**UNE-EN 1264-3:2010 (EN 1264-3:2009)**  
**UNE-EN 1264-4:2010 (EN 1264-4:2009)**

Para conceder este Certificado, AENOR ha ensayado el producto y ha comprobado el sistema de la calidad aplicado para su elaboración. AENOR realiza estas actividades periódicamente mientras el Certificado no haya sido anulado, según se establece en el Reglamento Particular RP 01.64.

In order to grant this Certificate, AENOR has tested the product and has verified the quality system used in its manufacture. AENOR performs these tasks periodically while the Certificate has not been cancelled, in accordance with the stipulations of the Specific Rules RP 01.64.

Fecha de concesión: **2013-07-18**  
First issued on:

Fecha de renovación: **2014-02-03**  
Renewed on:

Fecha de caducidad: **2019-02-03**  
Expires on:

  
**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación  
**Avelino BRITO MARQUINA**  
Director General de AENOR  
Chief Executive Officer

No está autorizada la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83



**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO N° 001 / 006039**  
 AENOR PRODUCT CERTIFICATE N°

Pg. 2/2  
2014-02-03

**DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA:** Marca Comercial: CLIMATIZACIÓN INVISIBLE UPONOR  
 Tipo de estructura de suelo: Tipo A  
 Tipo de Placa base: Panel portatubos poliestireno expandido UPONOR  
 Espesor de placa base: 0,033 m  
 Conductividad térmica de la placa: 0,035 W/mK  
 Tipo de recubrimiento: Mortero con aditivo UPONOR  
 Espesor de mortero: 0,05 m  
 Tipo de tubo: PEX-a Certificado AENOR N° 001/004810 ; Certificado AENOR N° 001/005150  
 Dimensión de tubo: 16 x 1,8 mm

**SYSTEM DESCRIPTION:**

| PASO DE TUBO (mm)  | DENSIDAD DE FLUJO TÉRMICO NOMINAL $q_n$ (W/m <sup>2</sup> ) | INCREMENTO NOMINAL DE TEMPERATURA AIRE-AGUA $\Delta T(K)$ | COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN TÉRMICA EQUIVALENTE $K_H$ (W/m <sup>2</sup> K) | MÉTODO DE VERIFICACIÓN | FECHA      |
|--------------------|---|---|---|------------------------|------------|
| PIPE DISTANCE (mm) | STANDARD SPECIFIC THERMAL OUTPUT $q_n$ (W/m <sup>2</sup> )  | STANDARD TEMPERATURE DIFFERENCE $\Delta T(K)$             | EQUIVALENT THERMAL TRANSMITTANCE $K_H$ (W/m <sup>2</sup> K)               | VERIFICATION METHOD    | DATE       |
| 100                | 99,78   | 15,35   | 6,50  | Experimental           | 2012-02-09 |
| 150                | 95,64   | 18,04   | 5,30  | Experimental           | 2012-02-09 |
| 200                | 92,00   | 18,36   | 5,01  | Experimental           | 2013-07-18 |
| 300                | 81,25   | 22,67   | 3,61  | Cálculo teórico        | 2009-02-03 |

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación



**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO N° 001 / 006010**  
AENOR PRODUCT CERTIFICATE N°

Pg. 1/2  
2013-05-24

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) certifica que el producto  
The Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR) certifies that the product

**SISTEMAS DE SUELO RADIANTE**

**FLOORING HEATING SYSTEMS**

detallado en la(s) página(s) siguiente(s), detailed in the following page(s),

suministrado por supplied by

**UPONOR HISPANIA, S.A.U.**  
**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

y elaborado en and manufactured in

**POLIGONO INDUSTRIAL 1, CALLE C, 24**  
**28938 MOSTOLES (Madrid - España)**

es conforme con complies with

**UNE-EN 1264-1:1998 (EN 1264-1:1997)**  
**UNE-EN 1264-2:2009 (EN 1264-2:2008)**  
**UNE-EN 1264-3:2010 (EN 1264-3:2009)**  
**UNE-EN 1264-4:2010 (EN 1264-4:2009)**

Para conceder este Certificado, AENOR ha ensayado el producto y ha comprobado el sistema de la calidad aplicado para su elaboración. AENOR realiza estas actividades periódicamente mientras el Certificado no haya sido anulado, según se establece en el Reglamento Particular RP 01.64.

In order to grant this Certificate, AENOR has tested the product and has verified the quality system used in its manufacture. AENOR performs these tasks periodically while the Certificate has not been cancelled, in accordance with the stipulations of the Specific Rules RP 01.64.

Fecha de concesión: **2013-05-24**  
First issued on:

Fecha de caducidad: **2018-05-24**  
Expires on:



**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación  
**Avelino BRITO MARQUINA**  
Director General de AENOR  
Chief Executive Officer

No está autorizada la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83



**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO N° 001 / 006010**  
 AENOR PRODUCT CERTIFICATE N°

Pg. 2/2  
2013-05-24

**DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA:** Marca Comercial: CLIMATIZACIÓN INVISIBLE UPONOR. KLETT AUTOFIJIACIÓN  
 Tipo de estructura de suelo: Tipo A  
 Tipo de Placa base: Panel portatubos poliestireno expandido KLETT AUTOFIJIACIÓN  
 Espesor de placa base: 0,025 m  
 Conductividad térmica de la placa: 0,045 W/mK  
 Tipo de recubrimiento: Mortero con aditivo UPONOR  
 Espesor de mortero: 0,05 m  
 Tipo de tubo: PEX-a Certificado AENOR N°001/005995  
 Dimensión de tubo: 16 x 1,8 mm

**SYSTEM DESCRIPTION:**

| PASO DE TUBO (mm)  | DENSIDAD DE FLUJO<br>TÉRMICO NOMINAL<br>$q_H$ (W/m <sup>2</sup> ) | INCREMENTO<br>NOMINAL DE<br>TEMPERATURA AIRE-<br>AGUA $\Delta T$ (K) | COEFICIENTE DE<br>TRANSMISIÓN TÉRMICA<br>EQUIVALENTE $K_H$ (W/m <sup>2</sup> K) | MÉTODO DE<br>VERIFICACIÓN | FECHA      |
|--------------------|---|--|---|---------------------------|------------|
| PIPE DISTANCE (mm) | STANDARD SPECIFIC<br>THERMAL OUTPUT<br>$q_H$ (W/m <sup>2</sup> )  | STANDARD<br>TEMPERATURE<br>DIFFERENCE $\Delta T$ (K)                 | EQUIVALENT THERMAL<br>TRANSMITTANCE $K_H$ (W/m <sup>2</sup> K)                  | VERIFICATION<br>METHOD    | DATE       |
| 100                | 90,71   | 15,02  | 6,57  | Experimental              | 2013-05-24 |
| 300                | 81,85   | 22,67  | 3,61  | Cálculo teórico           | 2013-05-24 |
| 200                | 93,25   | 19,62  | 4,75  | Cálculo teórico           | 2013-05-24 |
| 150                | 96,38   | 17,65  | 5,46  | Cálculo teórico           | 2013-05-24 |

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

