5. Aplicaciones Informáticas

Ya se ha explicado a lo largo del documento, que es una bomba de calor, una bomba de calor geotérmica, que es un intercambiador enterrado, las posibles configuraciones de éstos, los algoritmos que se utilizan para el dimensionado de instalaciones geotérmicas y se ha analizado el mercado en cuanto a bombas de calor geotérmicas.

En el mercado, además de catálogos e informaciones diversas sobre los elementos que se necesitan para el dimensionado de una instalación, se pueden encontrar diferentes programas que facilitan el trabajo y proponen varias soluciones a un mismo problema.

En concreto, a lo largo de este capítulo se mostrarán tres de ellos, sobre los cuales se realizará un caso práctico, con varias configuraciones, según lo permita el software en cuestión debido a que dos de ellos son programas de demostración y sus posibilidades están limitadas.

Estos programas serán:

- EED – Earth Energy Design [15], desarrollado por la Universidad de Lund, y comercializado por BLOCON, una compañía especializada en física de edificios, transferencia de calor y desarrollo de software.

- GLD – Ground Loop Design [16], desarrollado por la Universidad de Oklahoma y comercializado por Gaia Geothermal, LLC que trabaja con todos los miembros de la comunidad geotérmica – desde las multinacionales de ingeniería y universidades de ingeniería, hasta los instaladores y diseñadores residenciales – para reducir la huella del carbono en la atmósfera.

- Geo Ciatesa [17], desarrollado por la Universidad de Valencia en colaboración con CIATESA y permite calcular la longitud óptima de los intercambiadores enterrados asociados a las bombas de calor agua-agua.

5.1. EED – Earth Energy Design

La versión de EED que se utilizará será la versión 3.0 de demostración.

El objeto de este software es el cálculo de la temperatura del fluido a lo largo de la vida útil de la instalación, dando una idea de la saturación del terreno. Además obtiene parámetros tan importantes como la longitud del intercambiador, las resistencias térmicas (fluido-tuberías-terreno) y las cargas base y pico de calor extraído. Esto se explica en el epígrafe de datos de salida (5.1.3)

EED es un software para el diseño de intercambiadores de calor enterrados, basado en los modelos de Eskilson. Para grandes y complejas instalaciones, permite obtener una aproximación inicial antes de iniciar análisis más detallados. Para sistemas más simples y pequeños, realiza el esfuerzo de los cálculos, evitándose hipótesis inexactas.

Algunas consideraciones importantes que se deben tener en cuenta antes de continuar son:

- El numero de configuraciones que permite el programa: 798
- Numero de g-functions: 6385
- Tipos de intercambiadores de calor: tuberías coaxiales, tuberías en U (simple, doble, triple)
- Profundidad de los intercambiadores: 20 - 200 m
- Ratio interespaciado / profundidad: $0.02 \leq \frac{B}{H} \leq 0.5$
- Intervalo de tiempo (t' = tiempo adimensional): $-8.5 \leq \ln(t') \leq 3$
- Difusividad térmica: a (m²/s), con $t'=\frac{t}{t_s}$ y $t_s=\frac{H^2}{9a}$.
- Criterio a corto plazo (E_1 = integral exponencial): $0.5 \cdot E_1 \frac{r_b^2}{4at}$

Como en todo software de análisis, se tienen 3 bloques principales en el proceso:

- Datos de Entrada
- Cálculos
- Datos de Salida

5.1.1. Datos de entrada

Con respecto a los datos de entrada tenemos que hay diferentes submenús para cada dato de entrada específico. Estos son datos para los parámetros del terreno, sistemas de intercambio, resistencia térmica del intercambiador, propiedades del fluido caloportador, cargas base y pico y periodo de simulación. También se pueden introducir datos de coste, pero esa función no se va a utilizar en este documento.

Es importante señalar que de todos los datos de entrada, algunos quedarán fijados por el programa al ser una versión de evaluación.

Antes de desarrollar el epígrafe, y a modo de resumen, se muestra una tabla con los datos de entrada que se requieren en el programa:

Propiedades del terreno	Conductividad térmica (W/mK) Capacidad calorífica volumétrica (MJ/m^{3}K) Temperatura superficial del terreno (ºC) Flujo de calor geotérmico (W/m^2)	
Sistema de intercambio	Tipo de intercambiador: Coaxial o tubería en U (simple, doble o triple) Configuración geométrica del intercambiador: profundidad (m), interespaciado (m), diámetro de las tuberías (mm) Resistencia de contacto entre el exterior de la tubería y el terreno (mK/W) Conductividad térmica del relleno (W/mK) Flujo volumétrico (L/s)	
Tuberías del sistema de intercambio	Sistemas coaxiales: diámetro, espesor, conductividad térmica Intercambiador en U: diámetro exterior, espesor, conductividad térmica, distancia entre ejes de las tuberías de bajada y subida.	
Resistencia térmica del pozo	Resistencia fluido/tierra (mK/W) Resistencia interna (mK/W)	Puede calcularse con el programa, no es necesaria la introducción.
Fluido Caloportador	Conductividad térmica (W/mK) Calor específico (J/KgK) Densidad (Kg/m^3) Viscosidad (Kg/ms) Punto de congelación del fluido (ºC)	
Carga Base	Energía anual y perfil mensual: carga de frío y de calor anual (MWh), y Perfil porcentual de cómo se reparte esa carga en cada mes del año. Valores de energía mensuales: cargas mensuales directamente, COP/EER medio. Agua caliente sanitaria	
Carga pico	Carga máxima de calor (kW) y tiempo durante el cual la bomba puede dar esa potencia (h) Carga máxima de frío (kW) y tiempo durante el cual la bomba puede dar esa potencia (h)	
Periodo de simulación	Horizonte temporal (en años) Mes en el cual se comenzarán las simulaciones	

Tabla 5.1

Propiedades del terreno

Las propiedades del terreno a ingresar serán la conductividad térmica (W/(mK)), la capacidad calorífica volumétrica (MJ/(m^{3}K)), la temperatura superficial del terreno (ºC) y el flujo de calor geotérmico (W/m^2). De todos ellos el programa proporciona tablas para distintos materiales y localizaciones (Figura 5.1).

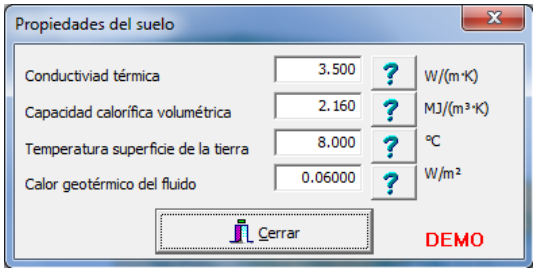

Figura 5.1

Sistema de intercambio

En cuanto a los sistemas de intercambio, se habrán de introducir ciertos datos en aras de definir completamente su comportamiento. Figura 5.2.

Lo primero que habrá que definir será el tipo. Hay dos grandes tipos: Coaxial y tubería en U, la configuración en U podrá ser simple, doble o triple.

A continuación se especificará la configuración geométrica del intercambiador. Existe una tabla en la que seleccionar la geometría plana (número de intercambiador en red) se deberá introducir la profundidad, el interespaciado y el diámetro de las tuberías para conocer la morfología completa.

Una vez conocida la forma y situación del sistema, se tendrá que especificar el comportamiento térmico a través de la resistencia de contacto entre el exterior de la tubería y el terreno, así como a través del flujo volumétrico en litros por segundo, de uno de los conductos o el conjunto de ellos. Además, este flujo será afectado por las posiciones en serie que se tengan, aplicándose un factor, que también habrá de introducirse.

El último paso para terminar de definir el comportamiento del sistema de intercambio será definir las tuberías, tanto interior como exterior, en sistemas coaxiales (diámetro, espesor y conductividad térmica), o el diámetro exterior, el espesor, la conductividad térmica y, la distancia entre ejes de las tuberías de bajada y subida del intercambiador en U.

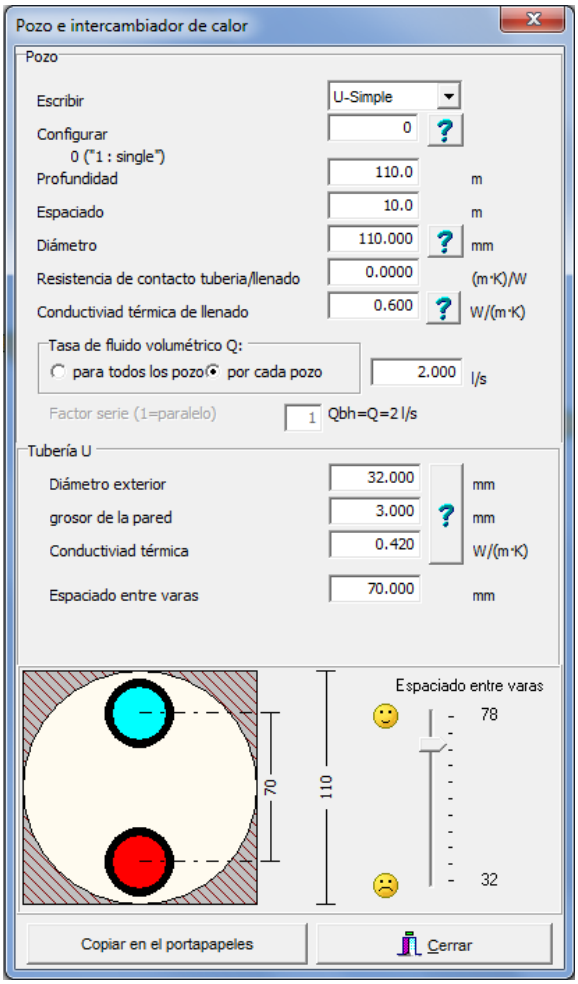

Figura 5.2

Resistencia térmica del pozo

El programa da la opción de introducir valores constantes, o permitirle calcularlos. Figura 5.3.

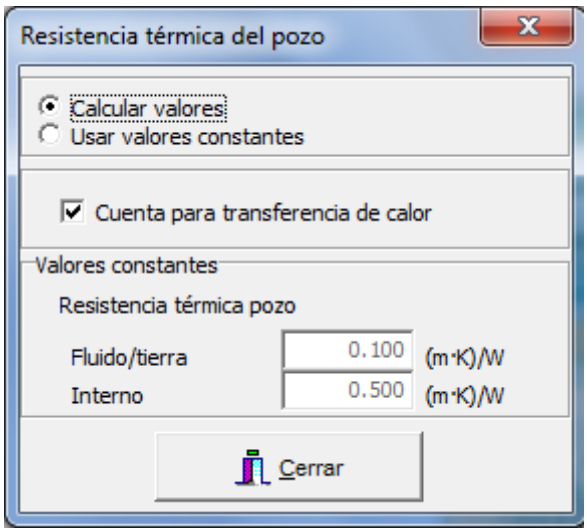

Figura 5.3.

Fluido Caloportador

Los datos de entrada necesarios para definir el fluido caloportador serán la conductividad térmica (W/mK), el calor específico (J/KgK), densidad (Kg/m^3), viscosidad (Kg/ms) y del punto de congelación del fluido (ºC). Figura 5.4.

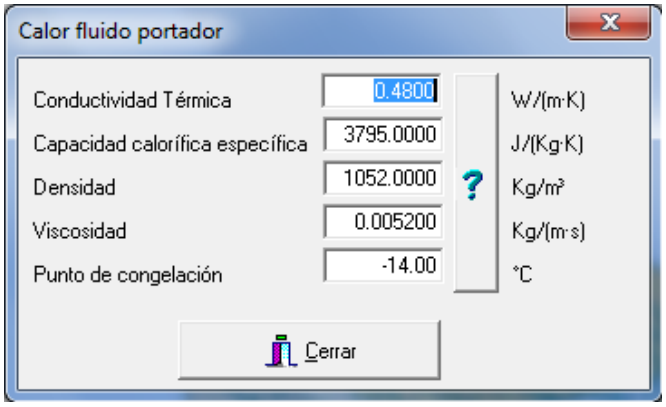

Figura 5.4

Existe una tabla que contiene información sobre los fluidos más comunes, proporcionando todos los parámetros necesarios.

Carga Base

El programa permite dos métodos de introducción de este dato:

- Energía anual y perfil mensual: que requiere la carga tanto de frío como de calor anual (MWh), y un perfil porcentual de cómo se reparte esa carga en cada mes del año.

- Valores de energía mensuales: que requiere las cargas mensuales directamente

Además de las cargas y el perfil según el caso, habrá que introducir el rendimiento medio (EER medio o COP medio) para la bomba de calor, o en caso de ser climatización directa[9], seleccionar esta opción.

El programa también realiza cálculos para la generación de agua caliente sanitaria, pero ese no es el tema que ocupa este estudio.

[9] La climatización directa supone el aprovechamiento del recurso en su estado, sin tratarlo, es decir, un sistema "direct cooling", por ejemplo, aprovecharía el agua del subsuelo a la temperatura a la que se extrae, sin la necesidad de una bomba de calor.

Figura 5.5

Carga pico

Para cada mes, se insertará la carga máxima de calor (que normalmente coincide con el máximo que la bomba de calor puede desarrollar) y el tiempo durante el cual la bomba puede dar esa potencia. De la misma forma se actuará con las cargas de refrigeración. Figura 5.6.

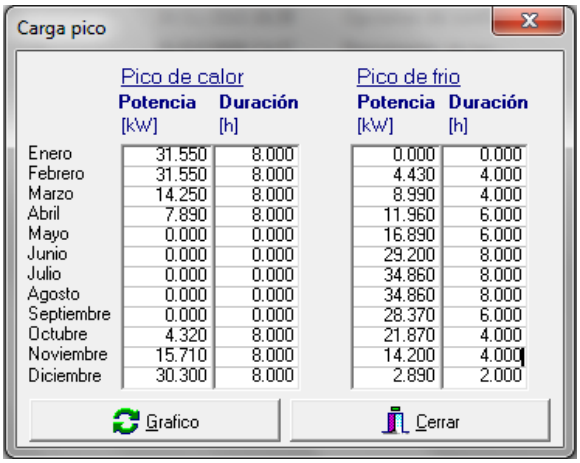

Figura 5.6

Periodo de simulación

Los datos a introducir serán el horizonte temporal para el cual se realizaran las simulaciones (en años) y el mes en el cual se comenzarán las simulaciones. Figura 5.7.

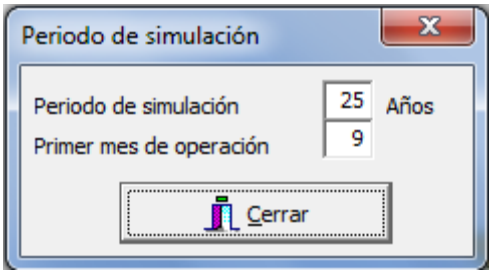

Figura 5.7

5.1.2. Cálculos

El software EED proporciona dos posibles situaciones de cálculo. La primera consiste en obtener la temperatura del fluido caloportador en una instalación ya definida y la segunda permite dimensionar la instalación de forma que el fluido se mantenga en unos límites establecidos.

También se puede realizar un cálculo de optimización, con criterio de longitud o de coste mínimo, mostrándose una lista con las posibles soluciones.

Si se fijan ciertos parámetros, como el coste inicial o el coste de las excavaciones, el programa calculará el coste total de la instalación.

5.1.3. Datos de salida

El fichero de salida de datos contiene información detallada del sistema. SE muestra una tabla resumen a continuación:

	Longitud total del pozo (m)
Resistencias Térmicas	Resistencia térmica interior del pozo (mK/W) Número de Reynolds Resistencia térmica fluido/tubería (mK/W) Resistencia Térmica tubería/llenado (mK/W) Resistencia de contacto tubería/llenado (mK/W) Resistencia térmica fluido/suelo del pozo (mK/W) Resistencia térmica efectiva del pozo (mK/W)
	Tasa de extracción de calor específico mensual (W/m)
Carga base: temperaturas	Temperatura de fluido mínima media al final de ENE (ºC) Temperatura de fluido máxima media al final de AGO (ºC)
Carga pico de calor	Temperatura de fluido mínima media al final de FEB (ºC) Temperatura de fluido máxima media al final de AGO (ºC)
Carga pico de frio	Temperatura de fluido mínima media al final de ENE (ºC) Temperatura de fluido máxima media al final de AGO (ºC)

Tabla 5.2

En primer lugar muestra un aviso sobre si el resultado ha tenido algún tipo de advertencia como que existan situaciones donde las temperaturas excedan los límites.

A continuación muestra un resumen con los datos de coste total, número de intercambiadores, longitud de cada uno y longitud total del sistema enterrado.

Tras esto presenta los datos de diseño que se han introducido, tanto del terreno, como de los intercambiadores, resistencias térmicas, fluido caloportador, y cargas base y pico y el periodo de simulación.

Después de los datos de diseño aparecen los valores calculados tales como la longitud total del sistema enterrado, las resistencias térmicas (fluido – tubería – terreno), el calor extraído mensual en W/m en función de las cargas base y pico (calor y frío). También presenta las temperaturas medias del fluido (según carga base o pico (frío y calor)) al final de cada mes (ºC) y las temperaturas máxima y mínima medias del último año de simulación y el mes en que se producen. Serán temperaturas medias a lo largo del intercambiador. La temperatura de entrada a la bomba de calor será un extremo del rango que produce la media.

El software también presenta gráficas sobre la evolución mensual de la temperatura a lo largo del último año de simulación (figura 5.8), así como la evolución de las temperaturas máximas y mínimas para cada año de simulación (figura 5.9).

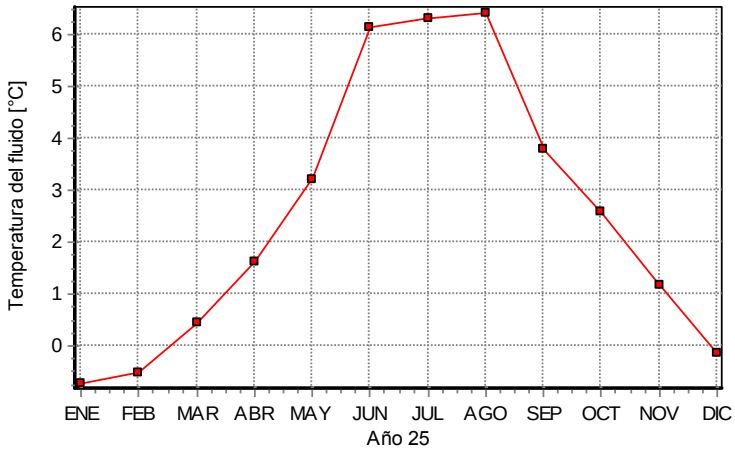

Figura 5.8

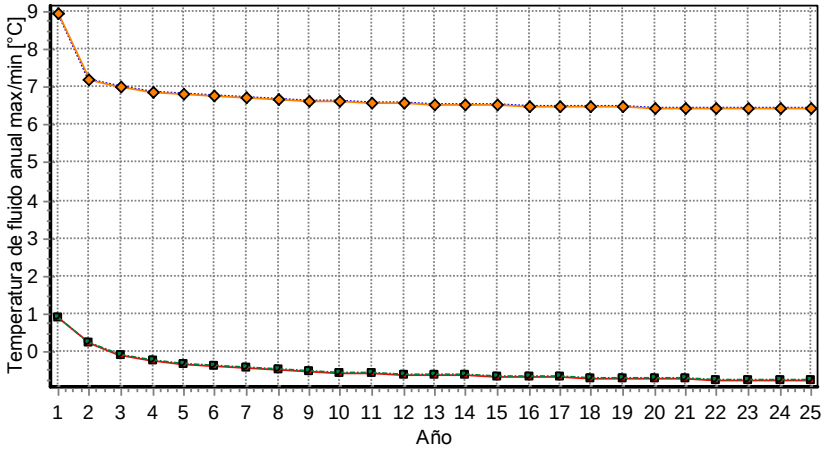

Figura 5.9

5.2.GLD – Ground Loop Design

GLD se ha concebido como un software de diseño para ingenieros y diseñadores profesionales de HVAC, en el área de las aplicaciones geotérmicas. Existen dos versiones, una para diseño comercial (industrial) y otra para diseño residencial. A lo largo de este epígrafe se considerará la versión industrial.

Este aplicación, en función de las cargas térmicas a la entrada y la configuración, calcula la longitud total (y de cada pozo), las cargas pico, las temperaturas a la entrada y salida del sistema, los rendimientos (COP/EER) y los caudales del fluido. Esto se muestra más detalladamente en el epígrafe 5.2.2

5.2.1. Datos de entrada

Esté software se divide en módulos: tres de diseño de intercambiadores (vertical, horizontal y de aguas superficiales – lagunas o lagos –) y dos de cargas térmicas (uno de cargas medias y otro de cargas zonales). También existe un módulo para introducir la información referente a la bomba de calor.

Antes de ahondar en el desarrollo de los datos de entrada se van a mostrar unas tablas resumen en función del modulo.

Módulos de cargas térmicas	
Cargas Zonales	Ocupación (días por semana que se ocupa) Ganancias y pérdidas de calor en 4 periodos del día (kW)
	Bomba de calor Seleccionar Introducir datos (frio y calor): • Capacidad (kW) • Consumo eléctrico (kW) • COP • Caudal (L/min) • Factor de carga parcial No es lo mismo que introducir una bomba nueva en el modulo de bombas de calor. Cuando se introducen estos datos, las variaciones de los parámetros no afectan a la bomba
Cargas Medias	Valores medios globales de cargas térmicas (kW)

Tabla 5.3

Módulos de diseño vertical	
Proyecto	Proyectista Empresa Fechas de diseño y ejecución
Potencia extra	Bombas de circulación: Potencia (kW) y eficiencia Torres de refrigeración: Potencia de la bomba (kW) y del ventilador (kW) Potencia extra (kW)
Configuración	Número de intercambiadores Número de bucles en paralelo por intercambiador
Tuberías	Geometría: diámetros interior y exterior (mm) Resistencia térmica tubería y el pozo (mK/W) Tipo de tubería Tipo de flujo (laminar/turbulento) Perforaciones; Diámetro del pozo (mm) Conductividad del relleno entre la tubería y el terreno (W/mK) Configuración de las tuberías en el interior de la excavación Cercanía a las paredes: Tuberías centradas; pegadas al pozo; pegadas entre sí
Propiedades del terreno	Conductividad (W/mK) Difusividad térmica (m^2/día) Temperatura en un punto no perturbado del terreno (ºC) Tiempo de simulación (años) Tipo de suelo
El fluido caloportador	Temperatura a la entrada según el régimen frío o calor (ºC) Caudal (L/min/3,5kW) Composición (para soluciones) Densidad (kg/m^3) Capacidad calorífica (kJ/kgK)

Tabla 5.4

Módulos de diseño horizontal	
Proyecto	Proyectista Empresa Fechas de diseño y ejecución
Potencia extra	Bombas de circulación: Potencia (kW) y eficiencia Torres de refrigeración: Potencia de la bomba (kW) y del ventilador (kW) Potencia extra (kW)
Configuración	Número zanjas Ancho de las zanjas Profundidad de las zanjas (m) Separación entre zanjas (m) Número de tuberías por zanja Separación horizontal y vertical dentro de la zanja (mm) Horizonte de cálculo (años)
Tuberías	Geometría: diámetros interior y exterior (mm) Resistencia térmica tubería (mK/W) Tipo de tubería Tipo de flujo (laminar/turbulento) El software calcula la resistencia térmica entre el fluido y el conducto.
Propiedades del terreno	Conductividad (W/mK) Difusividad térmica (m^2/día) Temperatura en un punto no perturbado del terreno (ºC) Tiempo de simulación (años) Tipo de suelo Diferencia de temperatura entre el día más cálido y el más frío del año, así como cuales son estos días, en aras de correcciones de la temperatura del terreno.
El fluido caloportador	Temperatura a la entrada según el régimen frío o calor (ºC) Caudal (l/min/3,5kW) Composición (para soluciones) Densidad (kg/m^3) Capacidad calorífica (kJ/kgK)

Tabla 5.5

5.2.1.1. Módulo de especificaciones de la Bomba de Calor

En GLD existe la posibilidad de elegir una bomba de calor de una base de datos que contiene modelos de equipos de diversas compañías fabricantes de bombas. Además, se pueden introducir datos de las bombas de calor que se vayan a utilizar, si no se encuentran en la base de datos.

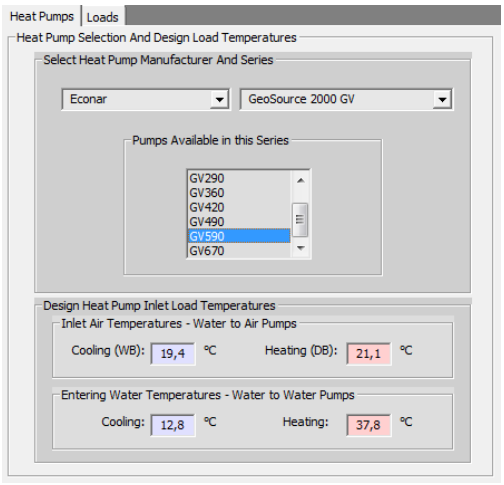

Figura 5.10

En el caso de introducir una bomba de calor se deberá introducir los parámetros necesarios para que se defina la curva de la bomba:

Tipo de bomba	Aire – agua Agua – agua
Especificaciones refrigeración	Figura 5.11
Especificaciones calefacción	Figura 5.12
Correcciones por temperatura para carga parcial	Figura 5.13
Correcciones por flujo para carga parcial	Figura 5.14

Tabla 5.4

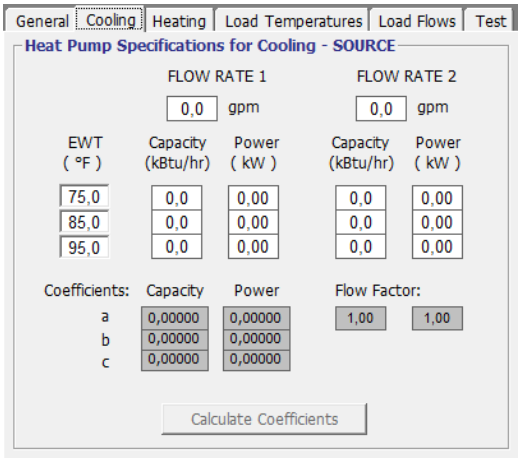

Figura 5.11

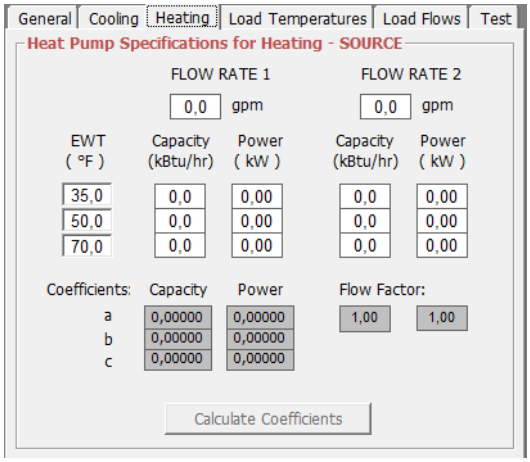

Figura 5.12

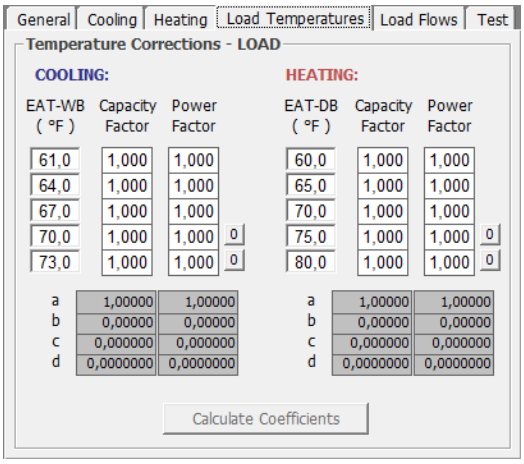

Figura 5.13

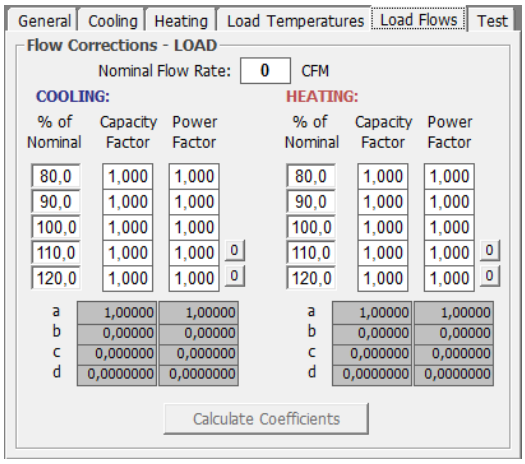

Figura 5.14

5.2.1.2. Módulos de cargas térmicas

Cargas Zonales

Para sistemas no centralizados, a menudo es necesario dividir las cargas y diferenciar zonas que serán alimentadas pos diferentes bombas de calor.

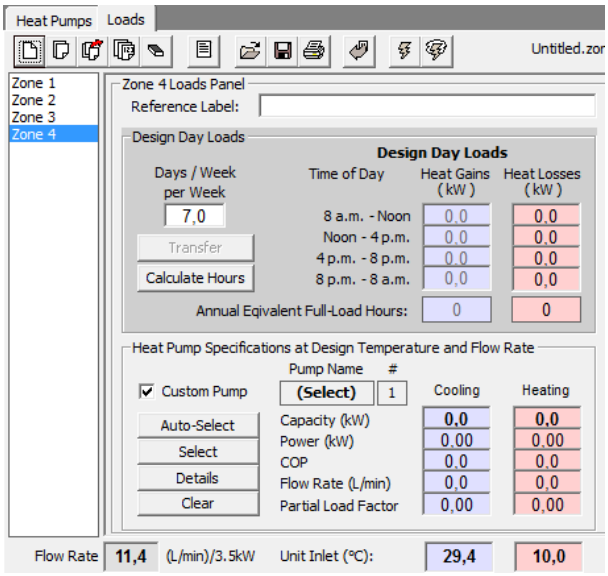

Figura 5.15

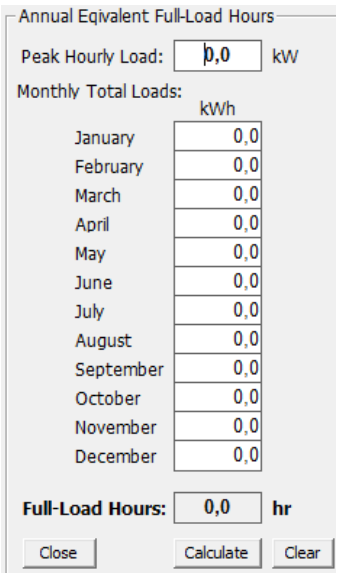

Figura 5.16

Este tipo de sistemas tiene ventajas como la de suponer una instalaciones de menor tamaño y con menores costes de mantenimiento.

Para cada zona que se dimensione, se necesitarán datos relacionados con la ocupación (días por semana que se ocupa) y ganancias y pérdidas de calor en 4 periodos del día, tres en horarios laborables y uno que comprende la noche (8.00 – 12:00 ; 12:00 – 16:00 ; 16:00 – 20:00 ; 20:00 – 8:00). Con estas transferencias térmicas y ocupación, el programa podrá obtener las horas equivalentes anuales a plena carga. También se pueden calcular a través de una herramienta que provee el programa para tal efecto.

Habrá que seleccionar una bomba de calor para cada zona, bien de la base de datos del programa (esta selección podrá ser automática o manual), o bien introduciendo datos específicos del equipo (capacidad, consumo eléctrico, COP, caudal y factor de carga parcial, tanto en régimen de calefacción como de refrigeración).

Cargas Medias

Para estimaciones rápidas y cálculos generales, no es necesario hacer un análisis zonal completo. En estos casos se pueden introducir parámetros aproximados de diseño, como valores medios globales de cargas térmicas.

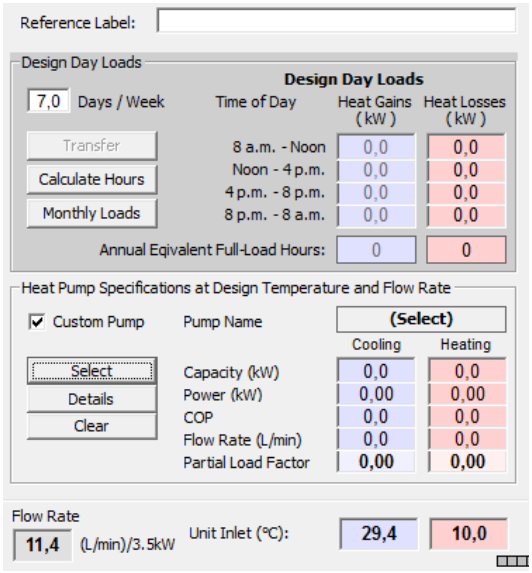

Figura 5.17

Este modulo es una limitación del anterior, reduciendo el número de zonas a uno.

5.2.1.3. Módulos de diseño

Diseño vertical

Para dimensionar un sistema vertical, se deberán introducir datos referentes a la información del proyecto, potencia extra, configuración, tuberías, terreno y fluido.

Información general

Los datos sobre la información del proyecto no son requeridos para el cálculo de los resultados, pero suministra información sobre el proyectista y la empresa a la que pertenece, así como las fechas de diseño y ejecución del proyecto.

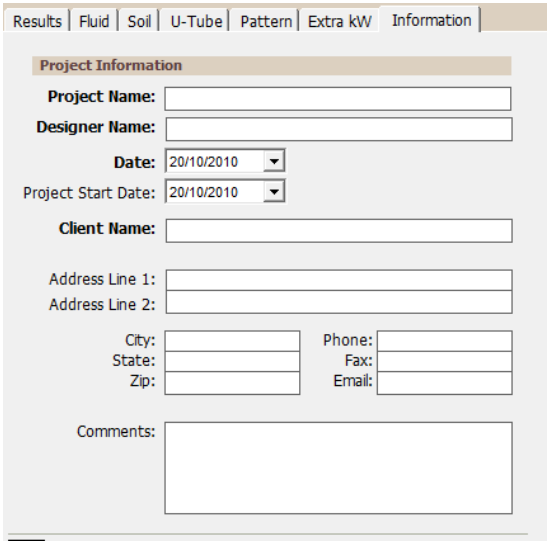

Figura 5.18

Potencia extra

La potencia extra hace referencia a las bombas de circulación – que requerirá la potencia de la bomba y su eficiencia – a las torres de refrigeración –, que solicita datos sobre la bomba y el ventilador – y a la potencia extra que pueda necesitarse. Existe la posibilidad de obtener la potencia de la bomba a través de una aplicación para tal efecto de la que está provista el software.

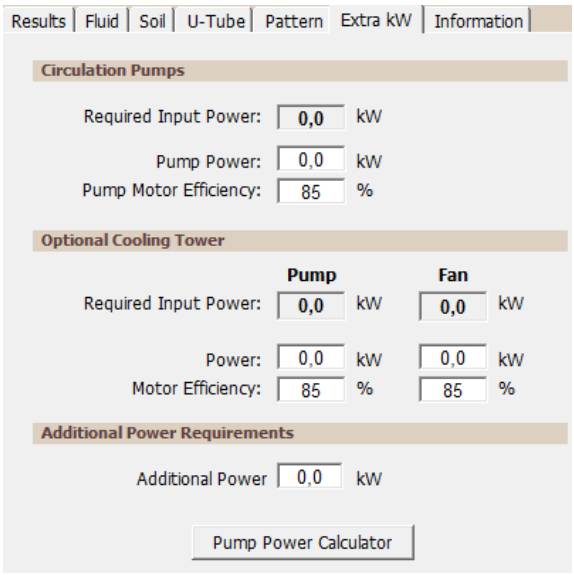

Figura 5.19

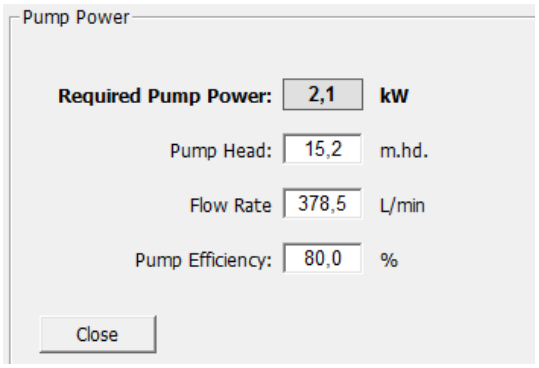

Figura 5.20

Configuración

La configuración requiere información sobre el número de intercambiadores (en dos direcciones perpendiculares), la distancia entre excavaciones y el número de bucles en paralelo por intercambiador

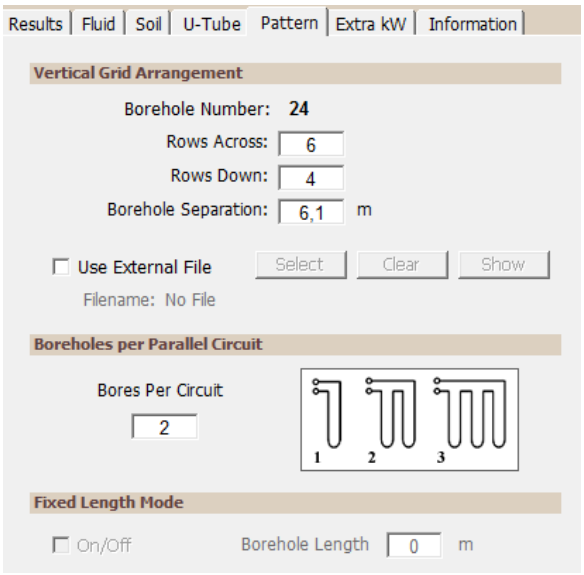

Figura 5.21

Tuberías

El diseño de las tuberías está orientado al cálculo de la resistencia térmica equivalente de la excavación. Así los datos que se necesitan son los datos geométricos de las tuberías y las perforaciones practicadas, así como la conductividad del relleno entre la tubería y el terreno, de la configuración de las tuberías en el interior de la excavación y la cercanía de éstas a las paredes del agujero. También deben introducirse datos relativos al tipo de flujo y tipo de la tubería.

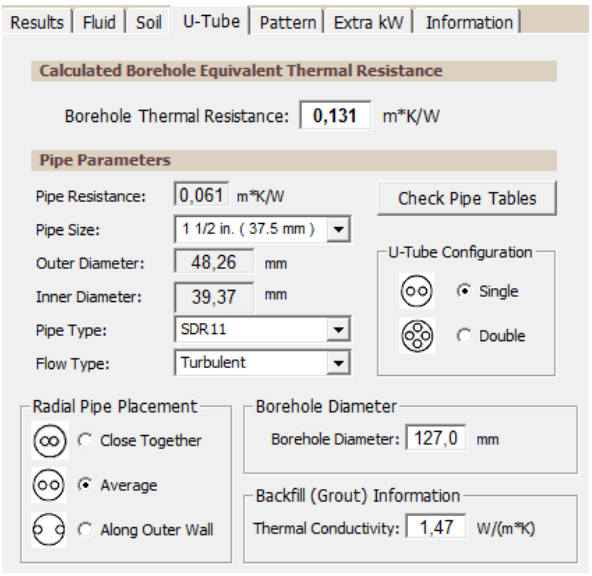

Figura 5.22

Propiedades del terreno

Las propiedades del terreno que deben introducirse son la conductividad y la difusividad térmica, así como la temperatura en un punto no perturbado del terreno y el tiempo de simulación, en años. El tipo de suelo puede extraerse de una tabla que proporciona el programa. La difusividad podrá obtenerse según la conductividad, el calor especifico, la densidad y la humedad del terreno – el programa incluye una aplicación para este cálculo –.

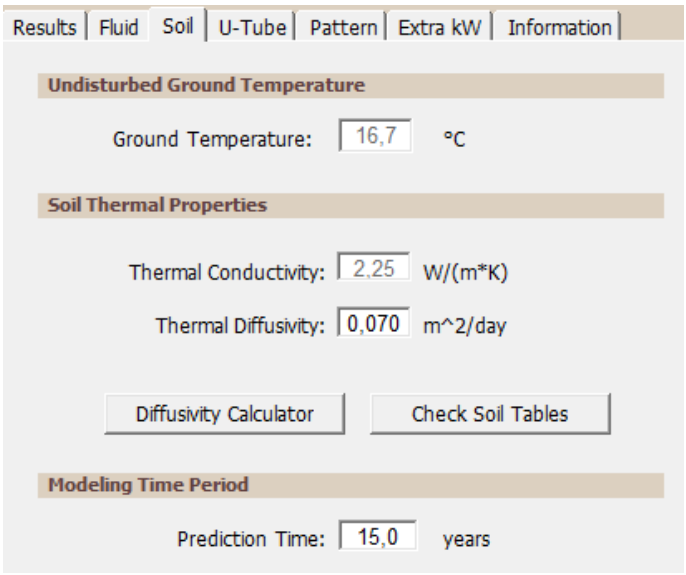

Figura 5.23

Fluido caloportador

El fluido caloportador se va a definir según su temperatura a la entrada según el régimen – frío o calor –, el caudal y la composición – en el caso de ser soluciones –.

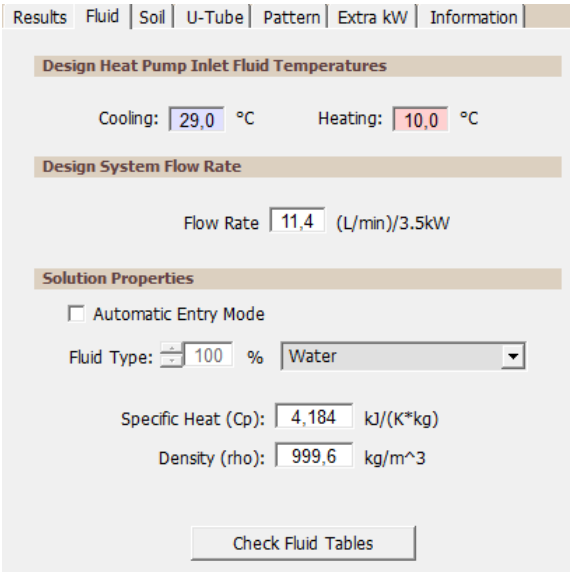

Figura 5.24

Diseño horizontal

En cuanto al dimensionamiento horizontal, se tienen varias similitudes con el sistema vertical, siendo idénticos los datos requeridos para la información del proyecto, la potencia extra y el fluido de trabajo. Además deberán de especificarse datos sobre la configuración, las tuberías y sobre el terreno.

La configuración horizontal difiere en gran medida de la configuración vertical. En este caso, se tienen zanjas y no excavaciones verticales, y habrá que proporcionar datos sobre el número, el ancho, la profundidad y la separación entre ellas. Además se debe definir el número de tuberías por zanja, así como la separación horizontal y vertical dentro de la zanja. Debe señalarse también el horizonte de cálculo, en años.

Introduciendo el tipo y dimensiones de la tubería, el software calcula la resistencia térmica entre el fluido y el conducto.

En referencia al terreno, se insertarán los mismos datos que en sistemas verticales, con el añadido de la diferencia de temperatura entre el día más cálido y el más frío del año, así como cuales son estos días, en aras de correcciones de la temperatura del terreno.

Aguas superficiales

El módulo de aguas superficiales tiene datos de entrada análogos a los sistemas vertical y horizontal, pero este tipo de configuraciones no se tendrá en cuenta para el desarrollo de este proyecto, por lo que no se explicará con el detalle de los anteriores.

5.2.2. Datos de salida

Los datos de salida de GLD, son diferentes según el tipo de instalación a que se diseñe y son valores de diseño, sin variación temporal:

Sistemas Verticales, tanto para calefacción como refrigeración:

- Longitud total de tubería
- Numero de excavaciones
- Longitud de las excavaciones
- Variación de la temperatura del terreno
- Temperatura de entrada al equipo
- Temperatura de salida al equipo
- Capacidad total
- Carga pico
- Demanda pico
- COP de la bomba de calor
- COP del sistema completo
- Caudal
- Información sobre la torre de refrigeración, en caso de existir.

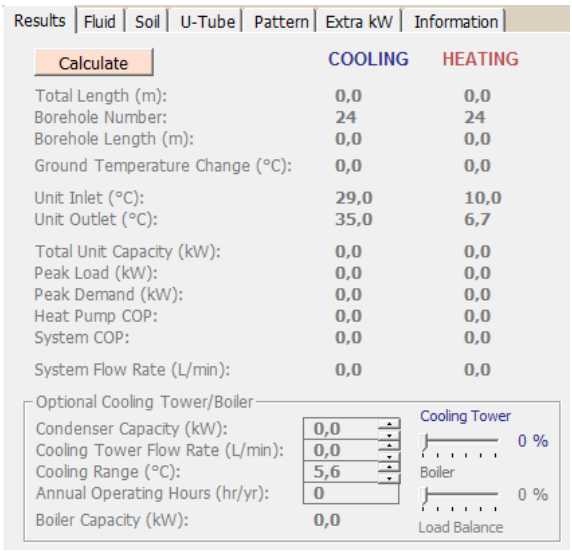

Figura 5.25

Sistemas Horizontales, tanto para calefacción como refrigeración:

- Longitud total de zanjas
- Número de zanjas
- Longitud de una zanja

- Longitud total de tubería
- Longitud de tubería por zanja
- Temperatura de entrada al equipo
- Temperatura de salida al equipo
- Capacidad total
- Carga pico
- Demanda pico
- COP de la bomba de calor
- COP del sistema completo
- Caudal
- Información sobre la torre de refrigeración, en caso de existir.

5.3. GEO CIATESA

En el caso de la aplicación informática GEO CIATESA, sí se dispone de la versión completa (versión 1.00), por lo que para este programa si se podrá maniobrar más a fondo con los parámetros, pero al perder la capacidad de comparación cuantitativa en uno y otro, se realizaran cálculos para ver cómo funciona el programa y que resultados muestra, sin tener especial interés en la comparación de resultados, si bien interesa en gran medida la comparación según el tipo de resultados.

GEO CIATESA nace como resultado de la colaboración entre la empresa CIATESA y la Universidad Politécnica de Valencia, fruto de la investigación en intercambiadores enterrados. El programa tiene incluidas bases de datos con bombas de calor (de CIATESA) de datos climáticos, suelos, tuberías, fluidos, etc., para hacer menos complejo el dimensionamiento de los intercambiadores (longitud necesaria para garantizar la climatización del local, área y volumen afectados por el intercambiador y pérdida de carga por fricción en el intercambiador), propósito principal de este software.

Como iniciativa para una climatización sostenible y reducción de consumo energético en sistemas de este tipo, el Proyecto Geocool plantea la climatización geotérmica como una alternativa.

El grupo de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV en lo que sigue) inició en el año 2000 un proyecto sobre climatización geotérmica, adaptándolo al mercado español, ya que en Estados unidos y el norte de Europa es ya una realidad.

Esta iniciativa derivo en el año 2003 en el Proyecto Geocool (Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along Coastal Areas), dentro del V Programa Marco de Investigación de la Unión Europea

El proyecto europeo GeoCool ha estado coordinado por la UPV, con el profesor Javier Urchueguía como responsable técnico, y forman parte del consorcio la empresa española Compañía Industrial de Aplicaciones Térmicas, S.A. (CIATESA), el Laboratory of Fluid Mechanics and Turbomachinery de la Aristotle University of Thessaloniki, en Grecia, la empresa holandesa Groenholland, el Ente per la Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA) en Italia y la Asociación para la Investigación y Diagnosis de la Energía (AEDIE) en España.

El software de CIATESA se basa en la metodología de la universidad de Oklahoma [18] y tiene como principal función el cálculo de la longitud de intercambiador enterrado, en función de la configuración, además muestra otros parámetros como el área y el volumen que ocupa este

intercambiador, las pérdidas de carga y las potencias térmicas y absorbida, todo en función de la temperatura de salida, tanto para frío como calor. Se verá un ejemplo en el apartado de resultados (5.3.3.) de la variación de la longitud con la configuración en función de la temperatura de salida, así como la variación del COP/EER y de la perdida de carga. El ejemplo estará basado en un sistema vertical y para varias distancias entre perforaciones y varios bucles.

Al igual que los programas explicados con anterioridad, el GEO CIATESA, también tiene una estructura lógica, diferenciándose ésta en Entrada de Datos, Cálculos y Salida de Datos.

La interfaz se divide en 5 pestañas, donde las 4 primeras son de introducción de datos (configuración, materiales, clima y suelo y pérdidas de carga), y la última representa los resultados obtenidos tras el cálculo.

5.3.1. Datos de entrada

A continuación se expondrán las diferentes ventanas en las cuales se introducirán los datos pertinentes para la obtención de resultados.

Antes de comenzar a describir cada dato necesario para que el programa pueda calcular una solución, se va a mostrar una tabla con un resumen de estos datos de entrada.

Configuración	Horizontal	• Distancia entre dos secciones (m) • Número de secciones en paralelo • Profundidad de los tubos (m)
	Vertical	• Número de filas de pozos • Número de columnas de pozos • Distancia entre los pozos (m)

Materiales	Intercambiador enterrado	• Tuberías estándar y presión nominal de la base de datos interna
		• Tubería no normalizada:
		  o Conductividad del tubo (W/mK)
		  o Rugosidad absoluta (mm)
		  o Presión nominal (bar)
		• Dimensiones del intercambiador
		  o Normalizada (diámetro nominal)
		  o No normalizada
		  ▪ diámetro interior (mm)
		  ▪ diámetro exterior (mm)

	Colector	• tuberías estándar y presión nominal de la base de datos interna
		• tubería no normalizada
		  o rugosidad absoluta (mm)
		  o presión nominal (bar)
		• dimensiones del intercambiador
		  o normalizada (diámetro nominal desde un menú desplegable)
		  o no normalizada
		  ▪ diámetro interior (mm)

Clima y suelo	Zona climática	Seleccionar desde una base de datos interna

	El suelo	• Seleccionar e introducir humedad
		• Introducir suelo
		  o Conductividad del terreno (W/mK)
		  o Capacidad térmica del mismo (MJ/K·m^2)

	Carga térmica del edificio	• Tipo de vivienda • Cargas máximas de calefacción (invierno) y refrigeración (verano).
	Bomba	• Manual • Automático
	Fluido caloportador	• Seleccionar • Introducir su concertación si es una solución
Pérdidas de carga	Accesorios	Numero de codos (90º y 45º) Numero de reducciones Numero de válvulas Numero de Ts Numero de Us
	Longitud equivalente	

Tabla 5.5

5.3.1.1. Configuración

En la primera pestaña, de configuración de los intercambiadores enterrados, se pueden distinguir varios datos: el tipo de configuración y la composición de la configuración. Se puede seleccionar entre 5 configuraciones horizontales y una vertical y para cada una de estas tendrá que definirse el número de bucles del intercambiador.

Según la orientación del intercambiador se podrá definir, para intercambiadores horizontales, la distancia entre dos secciones – D –, el número de secciones en paralelo – N – y la profundidad de los tubos – P – y para intercambiadores verticales, el número de filas de pozos – M –, el número de columnas de pozos – N – y la distancia entre los pozos – D –. Figura 5.26.

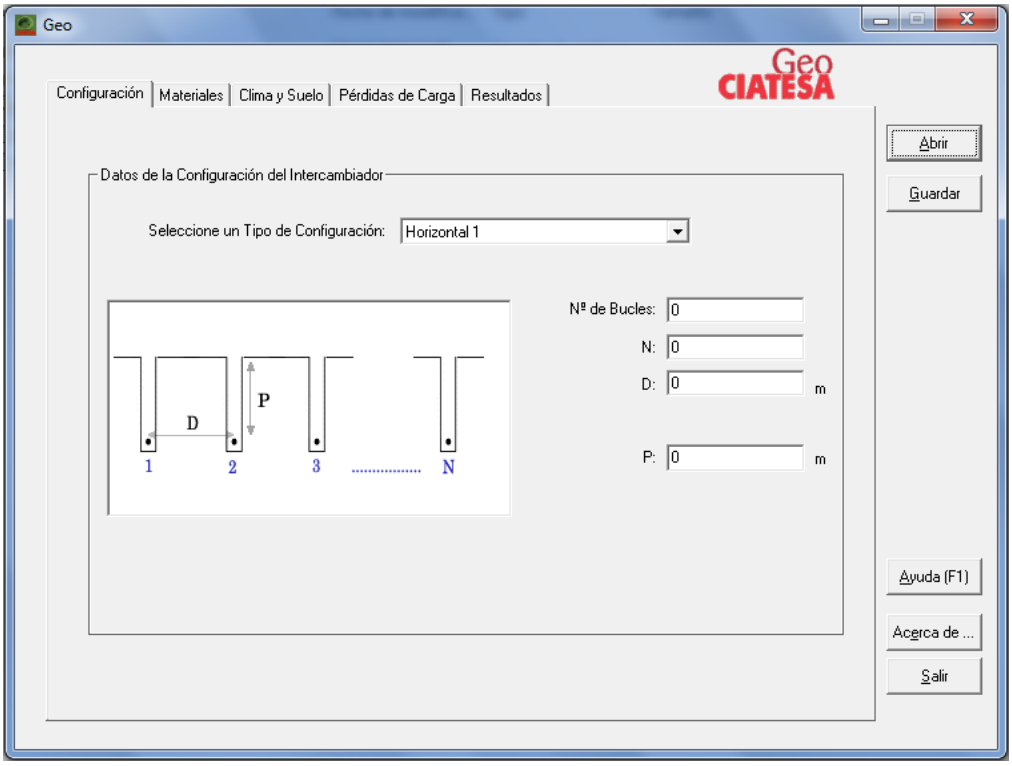

Figura 5.26

5.3.1.2. Materiales

En la pestaña de materiales se definen los tubos que el diseñador prefiere para la construcción del intercambiador enterrado. Figura 5.27.

Dentro de esta pestaña se disponen dos marcos diferentes, uno primero para definir las tuberías del intercambiador enterrado y un segundo que define el colector que une el intercambiador con la bomba de calor.

La información necesaria respecto al intercambiador se puede introducir de dos formas distintas: una seleccionando tuberías estándar y presión nominal de la base de datos interna

mediante sendos menús desplegables, y otra forma es introduciendo directamente la conductividad del tubo en W/mK, la rugosidad absoluta (mm) y la presión nominal (bar) del material que componga la tubería no normalizada.

Así mismo, las dimensiones del intercambiador se pueden introducir de forma normalizada (diámetro nominal desde un menú desplegable) o directamente, introduciendo el diámetro interior y el diámetro exterior del tubo (ambos en mm).

Respecto al colector, la introducción de los datos se realiza de la misma manera, salvo que cuando se opte por la forma no estándar, no deberá introducirse la conductividad térmica. Si bien el colector es lo suficientemente largo para tener pérdidas, estas no se consideran, y se consideran únicamente las pérdidas de presión por fricción

Para definir las dimensiones del colector, se puede seleccionar el diámetro desde un menú desplegable, o bien introducir directamente el valor del diámetro nominal en mm y la longitud total del colector (m).

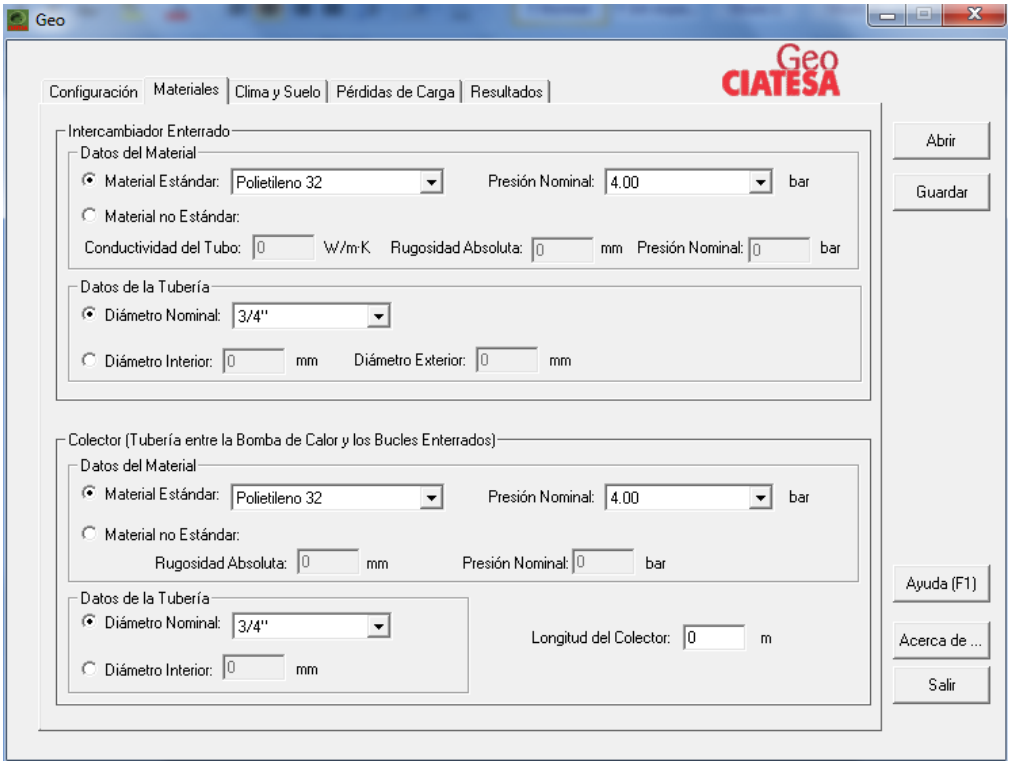

Figura 5.27

5.3.1.3. Clima y suelo

Tal y como enuncia la pestaña, se tratará de introducir o seleccionar los datos tanto de la zona climática (desde una base de datos interna) como de fijar el suelo (seleccionar desde un desplegable o insertar parámetros que lo definan). También en esta pestaña se definirán las

cargas térmicas del edificio a climatizar (frío y calor) y se seleccionará la bomba de calor a usar de todas las que CIATESA incluye en el software. Figura 5.28.

Para definir el clima tan solo habrá que seleccionar la capital de provincia más cercana (o más parecida) al lugar en el que estamos diseñando el sistema. El suelo se definirá mediante un desplegable entre un total de veintiocho, indicando la humedad del mismo, a la distancia bajo tierra en que esté enterrado el intercambiador. O bien se podrán definir la conductividad del terreno (W/mK) y la capacidad térmica del mismo (MJ/K·m^2).

Para definir la carga térmica del edificio se deberá en primer lugar introducir el tipo de vivienda (para que el programa asigne un factor de utilización acorde al tipo) y las cargas máximas de calefacción (invierno) y refrigeración (verano).

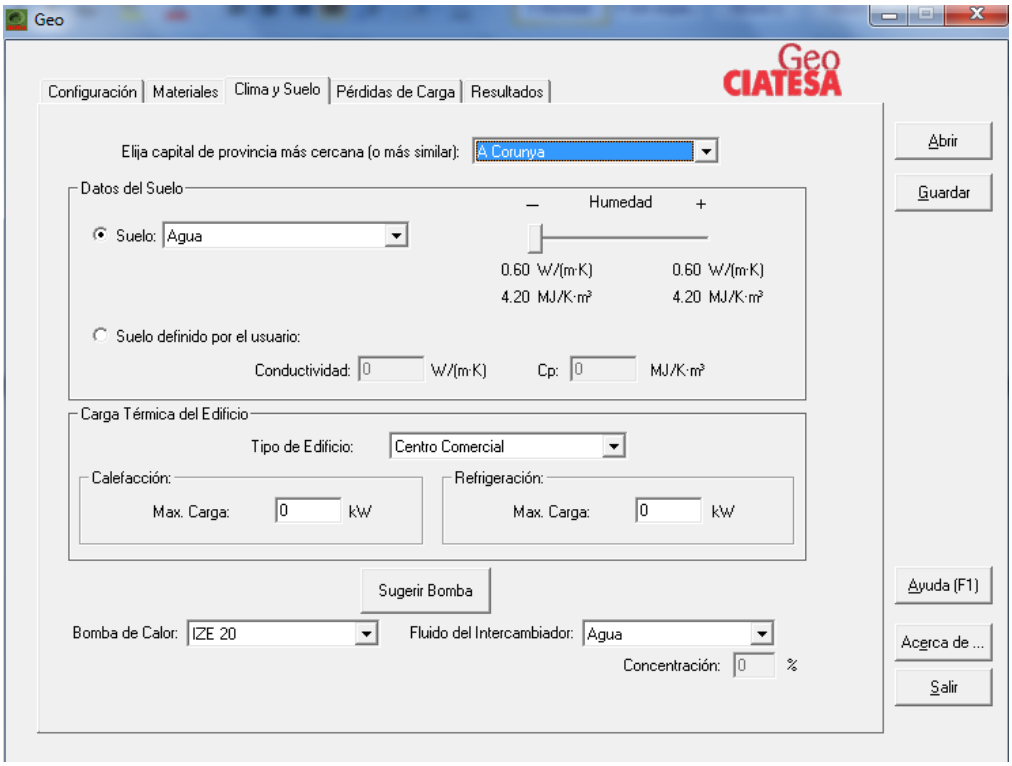

Figura 5.28

El último paso de este apartado es la selección de la bomba y el fluido caloportador (y su concertación si es una solución) o permitir al programa sugerir una en función de los parámetros introducidos.

5.3.1.4. Pérdidas de carga

Para que el sistema determine las pérdidas de carga se tienen dos opciones, o bien indicar el número total de accesorios de cada tipo que muestra (codos (90º y 45º), reducciones, válvulas,

Ts o Us) tanto para el colector como para el intercambiador, o bien indicar la longitud equivalente del colector y cada bucle. Figura 5.29.

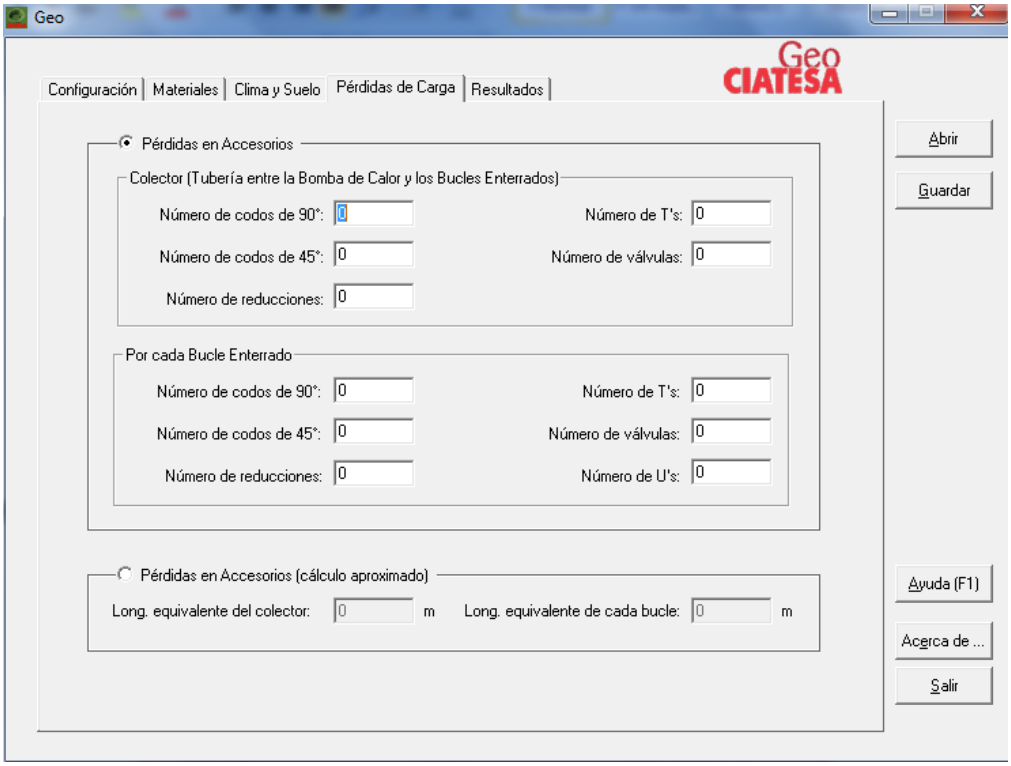

Figura 5.29

5.3.2. Datos de salida

Una vez introducidos todos los datos, ya se pueden obtener todos los resultados que provee el programa. Un resumen de estos es:

Datos de Salida
COP
Potencia calorífica (kW)
Potencia frigorífica (kW)
Potencia absorbida (kW)
Caudal nominal (m^3/h)
Temperatura de salida (ºC)
Longitud (m)
Área (m^2)
Volumen (m^3)
Pérdidas de carga

Tabla 5.6

En primer lugar se debe ejecutar el proceso de cálculo a través del comando “Calcular” en la pestaña de resultados.

Como se puede observar – Figura 5.30 – hay cuatro bloques de información donde se muestran las temperaturas de aplicación, los resultados para invierno y verano y los avisos

pertinentes. Se muestra sin resultados para diferenciar las secciones de la pestaña, más adelante se explican los resultados.

Las temperaturas de aplicación se refieren a la temperatura de entrada y salida de la bomba de calor según el régimen de trabajo de la bomba (refrigeración o calefacción), siendo en verano la salida de la bomba a 7 ºC (entrada a 7 ºC a las baterías que suministran el aire al local) y la entrada a 12 ºC (salida a 12 ºC de las baterías), y en invierno en régimen de calefacción, la salida de la bomba a 50 ºC (entrada a 50 ºC a las baterías que suministran el aire al local) y la entrada a 45 ºC (salida a 45 ºC de las baterías). Donde caliente es la mayor de las dos y fría la menor, según el régimen en que se encuentre el sistema.

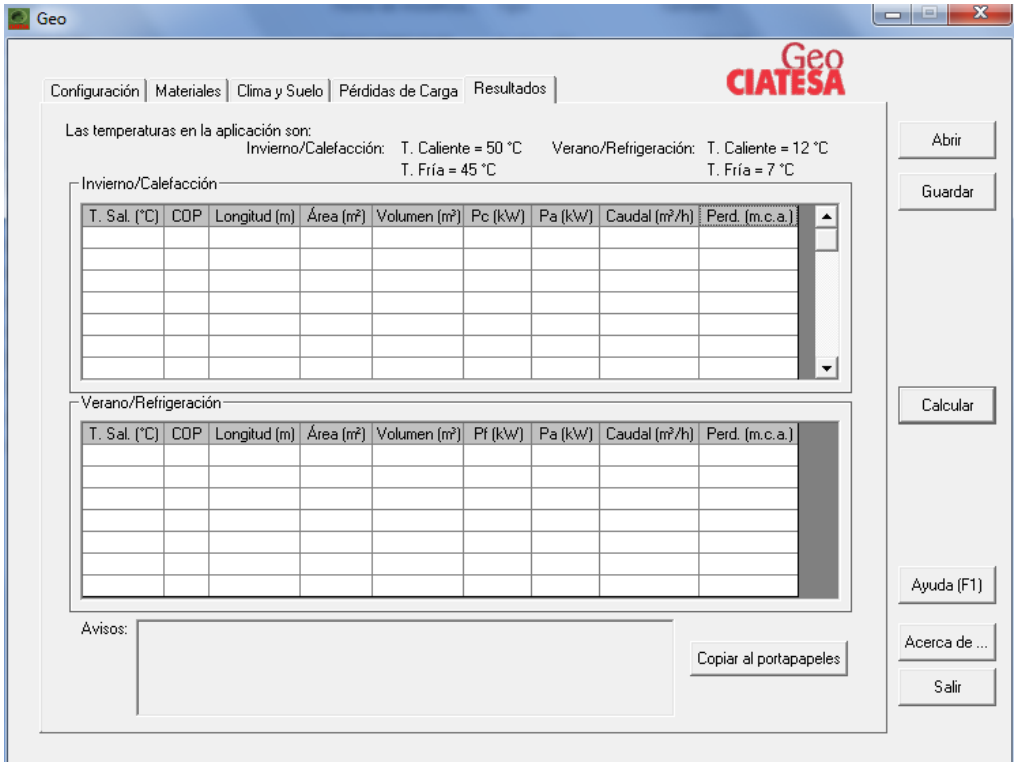

Figura 5.30

El software de CIATESA muestra los resultados divididos en calefacción y refrigeración, mostrando datos tales como el COP, la potencia calorífica (P_c), frigorífica (P_f) y absorbida (P_a), el caudal nominal de la bomba de calor, la temperatura de salida de la bomba de calor, la longitud del intercambiador, el área y el volumen que ocupará y las pérdidas de carga en el sistema completo (colector, accesorios, intercambiador y bomba de calor). A continuación se detalla cada uno de estos parámetros de salida:

- COP: GEO CIATESA calcula es el COP mínimo, en base a las condiciones más desfavorables (suelo saturado en verano, por ejemplo) por lo que, al suponer que las

condiciones no son extremas, en casi todo momento se rebaja con un COP mayor al referido en este apartado de resultados.

- P_c: Potencia calorífica de la bomba en calefacción para unas condiciones especificas de temperatura de salida de agua fría y caliente de la bomba de calor.
- P_f: Potencia frigorífica de la bomba en refrigeración para unas condiciones especificas de temperatura de salida de agua fría y caliente de la bomba de calor.
- P_a: Potencia absorbida o potencia eléctrica consumida por el compresor para unas condiciones específicas de temperatura de salida de agua fría y caliente de la bomba de calor.
- Caudal nominal: Caudal nominal con el que se garantizan las prestaciones de la bomba de calor.
- Temperatura de salida: Es la temperatura de salida del agua de la bomba de calor al final de la estación de invierno/calefacción o verano/refrigeración.
- Longitud: Es la longitud total de tubo calculada para unas condiciones específicas de temperatura de salida de agua fría y caliente de la bomba de calor.
- Área: es la parte superior del suelo justo encima del intercambiador.
- Volumen: es el volumen que se obtiene al multiplicar el área afectada por la profundidad máxima de los colectores en los intercambiadores horizontales, y en los verticales es el volumen excavado, lo que se calcula como el área de un pozo por la longitud total, dividido por dos, ya que en un pozo entran un tubo de subida y otro de bajada.
- Pérdidas de carga – Perd. –: Es la pérdida de carga por fricciones (intercambiador enterrado (longitud y accesorios), colector (longitud y accesorios) y bomba de calor). Se expresa en metros de columna de agua (m.c.a.)

Los propios resultados se muestran en diferentes colores a fin de expresas con la mayor claridad posible la viabilidad de la solución, así se muestra en color verde el diseño correcto, en amarillo los diseños mejorables y en rojo los diseños que no son adecuados. Figura 5.31.

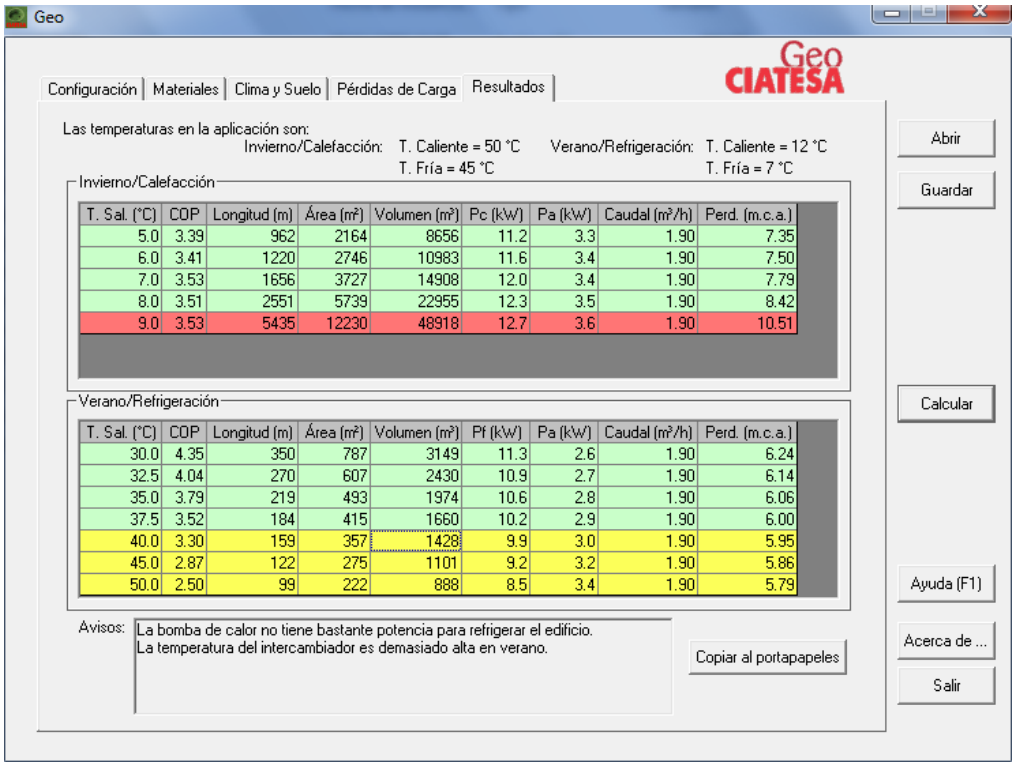

Figura 5.31

En el caso de estar marcado en amarillo o rojo, se muestran en el cuadro inferior avisos sobre los motivos de posibles mejoras o inadecuación del diseño. Los avisos pueden ser sobre la presión (demasiado elevada, tanto en el intercambiador como en el colector), sobre la velocidad (demasiado baja o demasiado alta en los bucles del intercambiador), sobre la temperatura (demasiado alta en verano) o sobre la potencia (la bomba de calor no tiene suficiente potencia para refrigerar/calefactar el edificio), así, el manual del software define los avisos de la siguiente manera:

- *El intercambiador está sometido a una presión demasiado elevada: El aviso indica que la presión calculada en el sistema es mayor que la presión de la tubería que el usuario seleccionó. Esto se puede solucionar simplemente cambiando a una presión mayor si es que no se quiere cambiar la configuración u otro parámetro de diseño (tenga en cuenta que para intercambiadores verticales, la presión estática es importante, y aumenta en 1 bar por cada 10 metros de profundidad).*

- *El colector está sometido a una presión demasiado elevada: Al igual que el anterior, la presión calculada en el sistema es mayor que la presión que seleccionó el usuario en la definición del proyecto. Se puede solucionar cambiando a una presión mayor. Aquí hay que tener en cuenta que la presión del colector es la ocasionada por las pérdidas*

totales del sistema; no se tiene en cuenta la presión estática por profundidad, ya que por lo general el colector esté muy cerca de la superficie del suelo.

- *La velocidad en los bucles es demasiado baja: Este aviso indica que el flujo en los tubos del intercambiador es muy lento y ello no perjudica la transferencia de calor. Como solución, elija un diámetro de la tubería más pequeño, aumente el caudal seleccionando una bomba de calor más grande, o reduzca el número de bucles.*

- *La velocidad en los bucles es demasiado alta: Este aviso indica que por exceso de velocidad del flujo se ocasionan altas pérdidas por fricción y desgaste excesivo en la tubería. La solución pasa por elegir un diámetro de tubería más grande, disminuir el caudal eligiendo una bomba de calor más pequeña, o aumentar el número de bucles.*

- *La temperatura del intercambiador es demasiado alta en verano: Este aviso indica que el fluido en el intercambiador enterrado está muy caliente, lo que podría ocasionar un rápido deterioro de los tubos, y un bajo COP. En principio el usuario tendría que optar por otro punto de diseño en la longitud del intercambiador seleccionando una temperatura más baja, pero si persiste en trabajar a esta temperatura, se podría solucionar eligiendo polibutileno como material para los tubos, material que tiene una mayor vida útil a altas temperaturas.*

- *La bomba de calor no tiene bastante potencia para refrigerar el edificio: Este aviso indica que para la temperatura de salida del agua de la bomba de calor seleccionada, la potencia frigorífica que proporciona el equipo no es suficiente para refrigerar el edificio. Se puede solucionar eligiendo una bomba más grande, o integrando un sistema auxiliar que supla la potencia frigorífica que falta.*

- *La bomba de calor no tiene bastante potencia para calentar el edificio: Este aviso indica que para la temperatura de salida del agua de la bomba de calor seleccionada, la potencia calorífica que proporciona la unidad no es suficiente para calentar el edificio. Esto se puede solucionar eligiendo una bomba más grande, o integrando un sistema auxiliar que supla la potencia calorífica que falta.*

5.3.3. Resultados numéricos

El hecho de poseer una aplicación sin restricciones nos permite hacer un estudio paramétrico de la longitud y la pérdida de carga en función de la distancia entre perforaciones en el primer caso y del número de bucles en el segundo. Se han realizado variaciones de distancias y número de bucles en un sistema vertical cuadrado con 100 perforaciones (10 de ancho por 10 de largo)

En el primero de los casos, se puede ver observando la figura 5.32 como al aumentar la temperatura de salida se reduce la longitud, debido a la menor necesidad de evacuación de calor al terreno. Además, según aumenta la distancia entre perforaciones, menor es la interacción entre las ramas del intercambiador y por tanto disminuye la longitud necesaria para el intercambio.

Atendiendo a los bucles, vemos como al aumentar el número, cae la perdida de carga al tener más caminos para el mismo caudal, es decir, se reduce la distancia que recorre el fluido y por tanto, aunque se tenga una distancia total idéntica, pero cada recorrido por cada bucle es menor, reduciéndose así la presión que se pierde en el trayecto. Este efecto se puede observar para el régimen de refrigeración en la figura 5.33

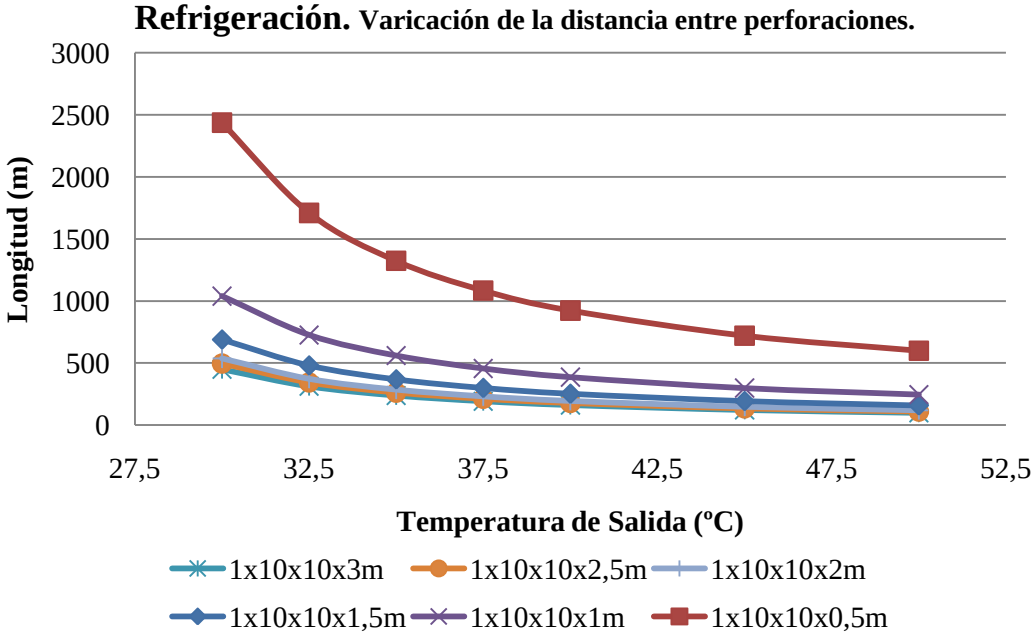

Figura 5.32

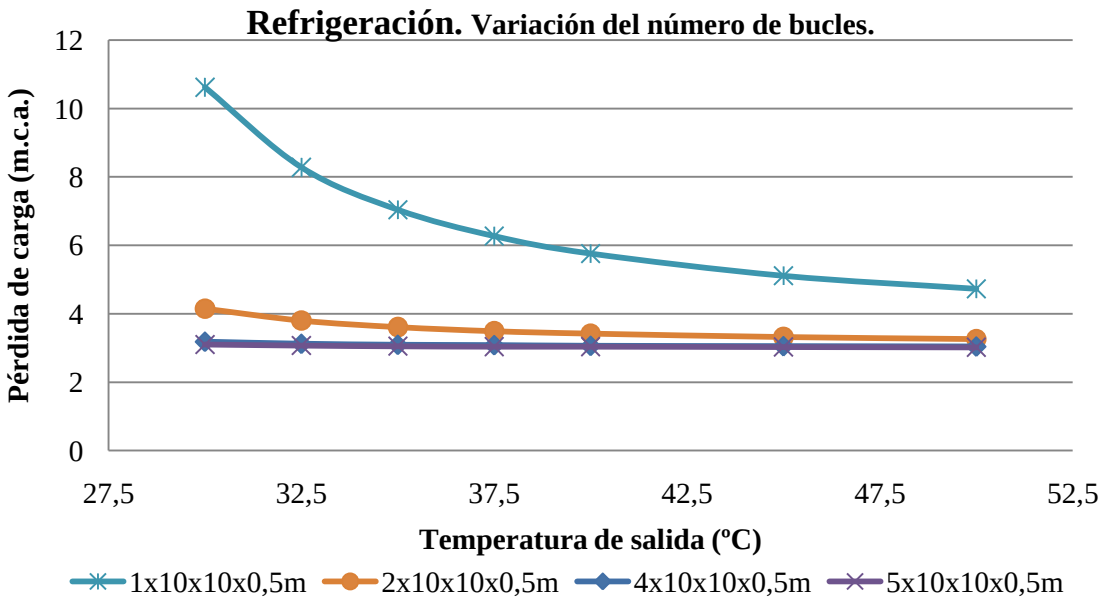

Figura 5.33

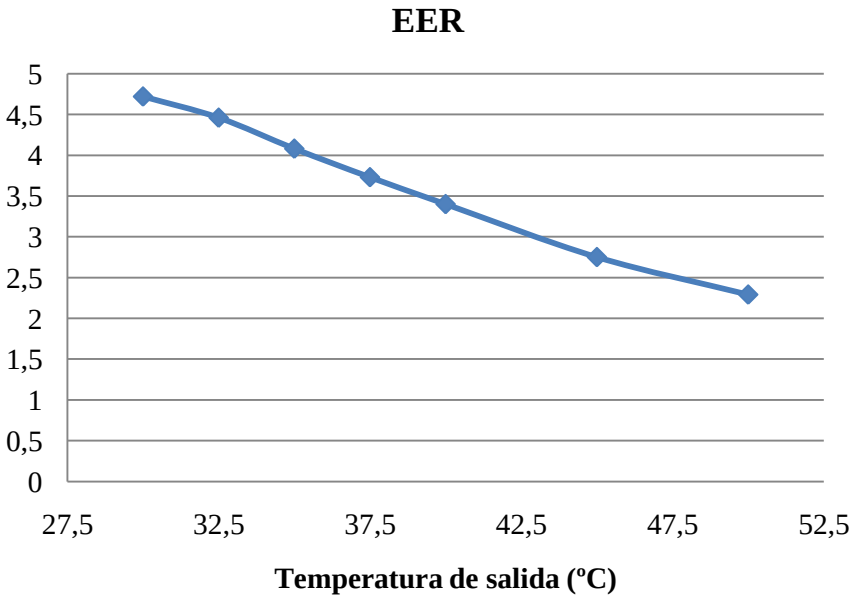

Figura 5.34

El EER es independiente del numero de bucles y la distancia entre intercambiadores, según los datos que arroja el programa GeoCiatesa, pero se puede observar como disminuye a medida que aumenta la temperatura de salida, lo que hace necesario un problema de optimización para maximizar la eficiencia reduciendo el coste, ya que esta es la misma tendencia que sigue la longitud de intercambiador.

Estos mismos efectos, pero al disminuir la temperatura de salida ocurre en el régimen de calefacción para la variación de la distancia entre perforaciones y del numero de bucles y se observa en las figuras 5.35 y 5.36.

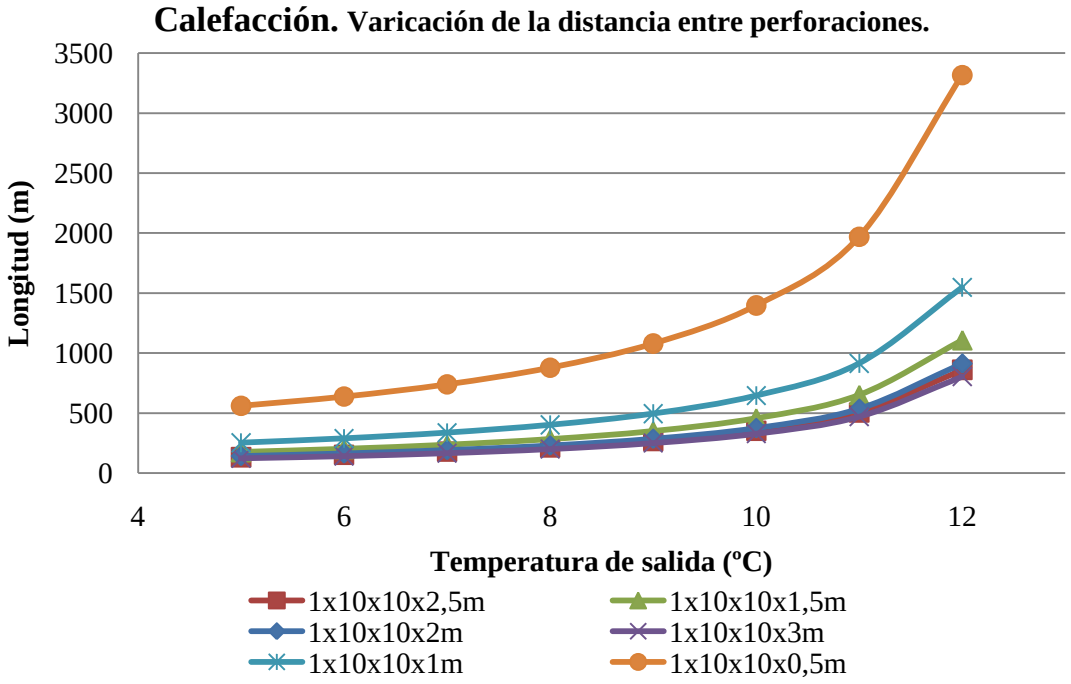

Figura 5.35

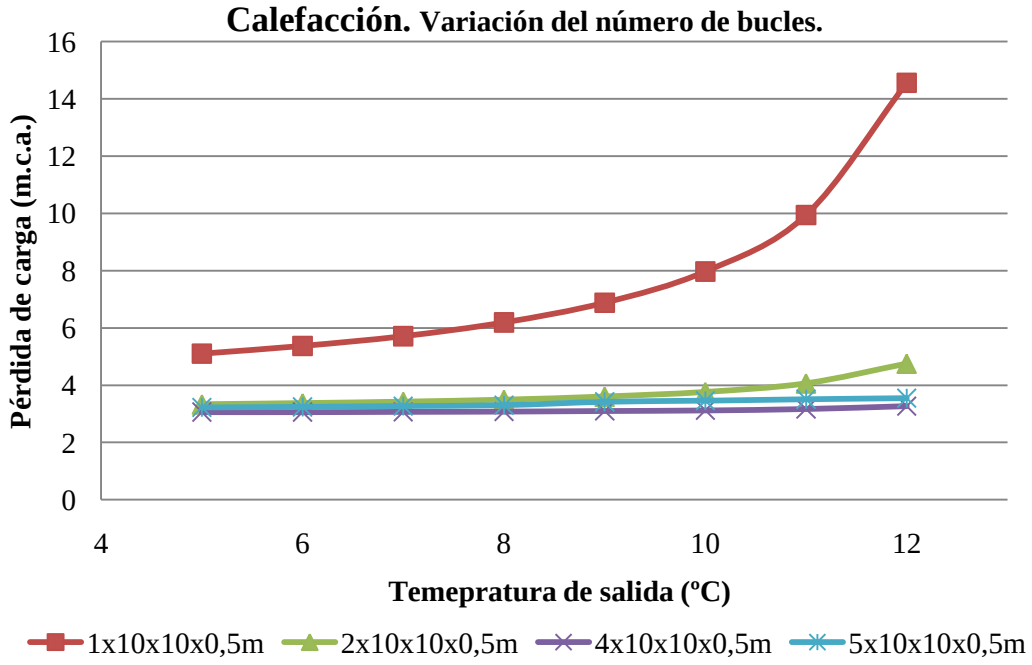

Figura 5.36

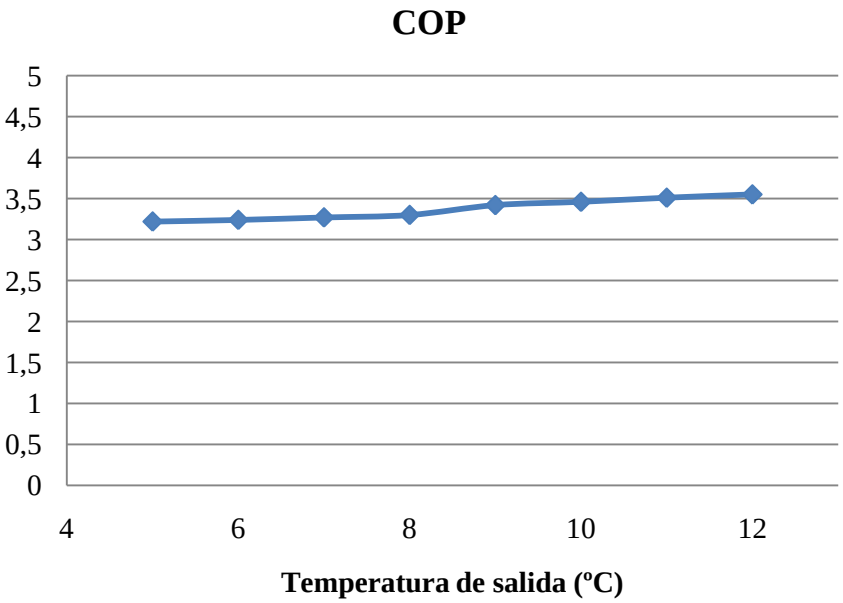

Figura 5.37

En el caso del COP, se mantiene aproximadamente constante con la temperatura, variando entre 3,22 y 3,55, lo que hace que la selección la gobiernen la longitud de intercambiador y las pérdidas de carga, para minimizar tanto el coste de instalación como el de mantenimiento.