



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de una herramienta en Matlab para la
evaluación estimativa de los costes y rendimientos de una
instalación de climatización geotérmica de bucle cerrado.
Aplicación en los principales edificios del campus de la
Universitat Politècnica de València (UPV).

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

AUTOR/A: Soler López, Pablo

Tutor/a: Magraner Benedicto, María Teresa

Cotutor/a: Mateo Pla, Miguel Ángel

Director/a Experimental: BADENES BADENES, BORJA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1	Contexto.....	3
1.2	Motivación.....	3
1.3	Alcance y limitaciones	4
1.4	Objetivos	5
1.5	Estructura de la memoria.....	6
1.6	Relación con la titulación	6
1.7	Relación con los ODS.....	6
2.	LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	7
	Climatización de edificios mediante una BCG. Energía geotérmica somera.....	7
3.	METODOLOGÍA	10
3.1	Introducción	10
3.2	Ecuaciones de diseño	11
3.3	Pasos.....	14
4.	DISEÑO DEL SIMULADOR.....	15
4.1	Datos de entrada.....	16
4.2	Resultados.....	21
4.3	Entorno Gráfico	24
5.	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	37
6.	EJEMPLO DE APLICACIÓN	40
7.	CONCLUSIONES.....	43
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXO 1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	48
	ANEXO 2. RELACIÓN CON LOS ODS	49
	ANEXO 3. VALORES TABULADOS	50
	ANEXO 4. MANUAL DE USUARIO	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

En los últimos años, el aumento de la demanda energética correspondiente a la climatización en el sector terciario y residencial, la ha convertido en un porcentaje considerable con respecto al gasto energético total del país. Esto es debido al clima cálido que predomina en España, donde los equipos consumidores se combinan para satisfacer las demandas de calefacción y refrigeración, para alcanzar las condiciones de confort en un clima cada vez más adverso. A esto, hay que añadir un incremento de los costes de la electricidad y el gas en los últimos años que sumado a lo anterior, nos imponen la necesidad de una transición energética para afrontar esta situación [1].

Como axiomas en la sociedad actual, se asumen la eficiencia energética y el uso de fuentes de energía limpias con el medioambiente, como las claves a fin de alcanzar los objetivos marcados para un desarrollo sostenible y la reducción de los efectos del cambio climático. Para su logro y limitar este impacto, surge la necesidad de disminuir el consumo destinado a climatización y sus consiguientes emisiones, mediante el uso de energías térmicas renovables que permitan mejorar la eficiencia total de los sistemas actuales. Una de las energías que se pueden utilizar en este contexto es la energía geotérmica.

1.2 Motivación

La realización de este proyecto se plantea como una oportunidad para un estudiante en la especialidad energética de la Escuela de industriales, con el propósito de mostrar el potencial de explotación y las ventajas que se pueden obtener de la energía geotérmica en el ámbito de la climatización, y visibilizarla como una fuente de energía viable y accesible.

La explotación mediante una bomba de calor geotérmica de los aprovechamientos someros, cuya disponibilidad en el terreno es amplia, permiten alcanzar grandes mejoras en ahorro y eficiencia con respecto a los sistemas de climatización más recurrentes. Se consigue de este modo un mix energético más renovable [2], pues así se considera esta alternativa debido a su alto rendimiento. Todo en conjunto, hace de este concepto una interesante propuesta como Trabajo Fin de Grado.

Así mismo, como rasgo característico del proyecto, los objetivos y resultados a obtener se pretenden mostrar visualmente empleando una aplicación interactiva que simplifique el modelo a realizar y facilite su comprensión, simulando desde el principio el proceso a seguir y que dependa de las acciones del usuario.

1.3 Alcance y limitaciones

Debido a la gran actividad que se lleva a cabo diariamente en las instalaciones de la UPV, el consumo energético anual en climatización requerido dada esta presencia alcanza valores muy elevados, por lo que es de interés para la universidad tratar de reducir el consecuente desembolso económico e impacto medioambiental asociados a este gasto [3].

Dado el considerable porcentaje que representa la climatización para satisfacer la demanda térmica en los bloques del campus y en el sector terciario en general, surge la necesidad en el ámbito de la rehabilitación energética de edificios de realizar acciones que permitan aumentar la eficiencia energética de estos para tratar de reducir su consumo. Como vías para su consecución, se consideran medidas de actuación directa sobre el edificio o, como es el caso de este proyecto, a nivel de los equipos de climatización y mediante alternativas renovables.

Existe la posibilidad de aprovechar la temperatura estable en el subsuelo durante el año, para implementar sistemas de bomba de calor geotérmica mediante el diseño de intercambiadores de calor enterrados, que ayuden a reducir el consumo energético global de la UPV. Concretamente, instalaciones de bucle cerrado en vertical [4].

Se ha elaborado una aplicación en Matlab que simule la metodología a emplear en el proyecto para el cálculo de la longitud necesaria a perforar, mediante la lectura de los datos de consumo del edificio a seleccionar, las características del terreno y condiciones de operación del sistema a modificar, y que muestre como resultado un análisis de los gastos y de la eficiencia de la instalación. Esta se trata de una herramienta estimativa que trabaja bajo una serie de condicionantes en cuanto a las cargas de diseño o el intercambiador convencional vertical de bucle cerrado, por lo que los resultados del diseño, y los costes y ahorros calculados se toman como una aproximación inicial ante una futura implementación.

Parte del trabajo consiste en la explicación detallada de los mecanismos y operaciones a utilizar para la obtención de los datos de entrada y los valores necesarios, así como del diseño y funcionamiento de la herramienta informática. Además, para contrastar los resultados se han realizado ejemplos de aplicación sobre los bloques de edificios de la UPV, validando estos con programas cualificados en el diseño de instalaciones geotérmicas con tal de asegurar un comportamiento adecuado y sostenible en el sistema.

Finalmente, a modo de conclusión se efectúa una evaluación económica y medioambiental de los valores obtenidos en base a la nueva eficiencia de los sistemas, mostrando las ventajas globales en conjunto que se puede obtener de una fuente renovable y energéticamente fiable como es la geotermia. También se plantean mejoras o complementos a los sistemas diseñados que optimicen el gasto económico e incrementen su rentabilidad, así como funciones adicionales al simulador creado que revaloricen su uso.

1.4 Objetivos

En este proyecto, se lleva a cabo una simulación de la implementación de hipotéticas instalaciones de bomba de calor geotérmicas, en sustitución de los equipos de climatización de los principales edificios de la UPV con un consumo significativo. Posteriormente se efectúa un análisis en base a los resultados.

Como aditivo visual y demostrativo, se programa un simulador en Matlab que realice los cálculos necesarios en función de los valores de diseño a modificar por el usuario, pudiendo así aplicarlo en cualquier edificio y localización de la que se conozcan sus características.

Se puede dividir en los siguientes objetivos principales:

- Realizar un estudio energético de los edificios para identificar los valores en climatización e identificar todos los parámetros de diseño.
- Dimensionar las medidas de sistemas geotérmicos con intercambiador de calor enterrado. Realizar un análisis energético de la instalación.
- Valorar la viabilidad económica y el impacto ambiental.
- Programar la App de simulación con Matlab que realice parte de los pasos anteriores, facilitando la labor del diseñador.

La metodología a emplear se basa en los cálculos del método IGSHA (International Ground Source Heat Pump Association) [5]. A partir de las demandas energéticas que adquiriremos de los edificios y las propiedades del subsuelo a determinar, obtendremos la longitud necesaria de intercambiador enterrado en función de las temperaturas pertinentes, las condiciones de operación de la bomba y las propiedades del intercambiador. Esto nos posibilita obtener como estimación, los resultados de este nuevo sistema y, por consiguiente, la viabilidad de la medida.

Para disponer de los resultados finales del trabajo, se requiere del cumplimiento de los siguientes objetivos más específicos:

- Obtener las cargas térmicas, perfil horario y las características de los equipos de climatización de los edificios.
- Obtener de las propiedades térmicas del terreno y el intercambiador enterrado.
- Establecer las condiciones de operación de la bomba de calor y el conjunto.
- Calcular de la longitud del intercambiador de calor enterrado.
- Obtener de la nueva eficiencia de nuestro sistema.
- Calcular los ahorros generados.
- Realizar el código de Matlab que acceda a todos los datos de entrada y realice todos los cálculos necesarios.
- Optimizar y proponer mejoras a implementar.

1.5 Estructura de la memoria

Tras elaborar la introducción en torno a los objetivos y el alcance de este proyecto, se agrega una breve descripción a modo de estado del arte de la energía geotérmica y la modalidad a emplear para los sistemas que se pretende diseñar.

En cuanto al cuerpo de la memoria, primero se presenta la metodología a utilizar para la obtención de los resultados de la implementación de la medida, definiendo los mecanismos que la componen y comentando las ecuaciones y procesos a emplear. Posteriormente, se identifican todas las variables de entrada necesarias para el cálculo de los objetivos, incidiendo en su forma de obtención. Esto se implementa en el simulador a diseñar del cual se describe su interfaz, y se realizan ejemplos de aplicación sobre el mismo, validando los resultados obtenidos. Tras esto, se realiza una valoración y análisis de estos como conclusión, planteando posibles mejoras y alternativas en la supuesta instalación y en el simulador.

Finalmente, junto a la bibliografía y el presupuesto, se adjuntan todos los anexos pertinentes, incluyendo el manual de usuario que permita conocer el funcionamiento de la aplicación.

1.6 Relación con la titulación

Este trabajo de fin de grado tiene una gran relación con asignaturas vistas durante el grado de Ingeniería de la Energía como pueden ser las asignaturas de Transmisión de Calor, donde se estudian los intercambiadores de calor y los diferentes mecanismos de transferencia de calor, Termodinámica y Termodinámica técnica, en las que en ambas se estudia la determinación de las características térmicas y calóricas y los principios de bombas de calor, y Proyectos donde el alumno adquiere las bases para la elaboración de proyectos de ingeniería y de presupuestos. Tiene principal relación con la asignatura optativa de Geotermia donde se estudian tanto los intercambiadores geotérmicos, caracterización térmica del terreno y el diseño de instalaciones de climatización geotérmicas, adquiriendo las bases para este trabajo.

1.7 Relación con los ODS

Este proyecto está principalmente alineado con ODS7 "Energía asequible y no contaminante" ya que su finalidad es investigación en energía geotérmica, avanzando en una energía renovable más eficiente y rentable. Además, contribuye significativamente en consecución ODS11 (comunidades energéticas más sostenibles), ODS13 (lucha contra el cambio climático) reduciendo emisiones de CO₂ y ODS9 (fomento innovación) [6] (Anexo III).

2. LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La Geotermia basa su funcionamiento en el aprovechamiento del calor almacenado en el terreno por la radiación solar y el emitido por el núcleo del planeta. Posee distintas aplicaciones en función de la profundidad y el gradiente térmico asociado a esta, existiendo la vertiente destinada a la producción eléctrica (alta entalpía), a las fuentes termales o redes urbanas de calefacción (media y baja entalpía), y en la que nos centraremos en este proyecto, la geotermia somera o de poca profundidad (muy baja entalpía) que utiliza bombas de calor en la modalidad de climatización [7].

Las localizaciones del planeta cuya estructura subterránea y condiciones geológicas y físicas son propicias al almacenamiento de calor y un gradiente térmico óptimo, permiten explotar este recurso dado su elevada temperatura, para la producción continua de energía mediante centrales térmicas. Mientras que, con mayor disponibilidad en el terreno, se aprovecha la energía renovable del sol cedida al terreno a poca profundidad, para emplearlo como foco frío de intercambio con la estancia a climatizar mediante el uso de bombas de calor geotérmicas (BCG).

Climatización de edificios mediante una BCG.

Energía geotérmica somera.

A partir de cierta profundidad, la temperatura del subsuelo se mantiene prácticamente estable durante todo el año. La BCG que funciona al igual que las convencionales por el ciclo de compresión, permite lograr una eficiencia superior de en torno a un 50% con respecto al resto de sistemas similares ya que, al emplear el terreno como foco térmico en vez del aire exterior, es necesario un menor consumo por parte del compresor para vencer la diferencia de temperaturas. El ahorro obtenido puede alcanzar un 75% si los equipos que se sustituyen hacen uso de combustibles fósiles.

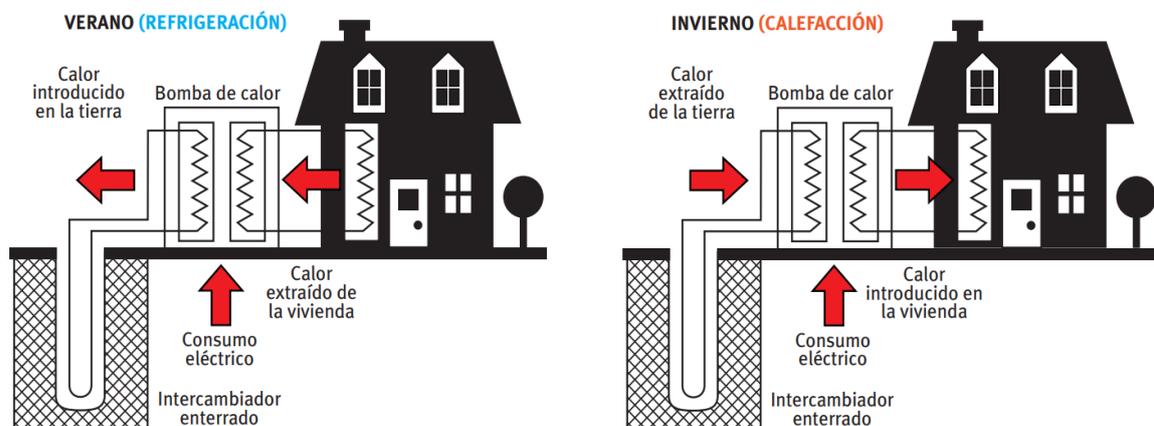


Fig. 2.1-Funcionamiento de una instalación geotérmica mediante BCG [4]

En modo calefacción, la BCG absorbe el calor del terreno para cederlo al interior y en refrigeración lo extrae para reinyectarlo de vuelta, por lo que es necesario un buen dimensionado para mantener balanceado el terreno térmicamente y evitar variaciones en la temperatura de este con el paso del tiempo.

Existen distintos modos para el diseño del intercambiador de calor enterrado, siendo el circuito cerrado el más utilizado con agua como fluido caloportador (uso de anticongelante en función de la temperatura mínima), con configuración en horizontal o vertical dependiendo de la situación. La horizontal es más sencilla y menos costosa, de uso adecuado para nueva construcción y un gran terreno disponible, tratando de no interferir en la obra. En vertical se emplea como actuación en edificios ya existentes, el área afectada y la longitud de tubería es menor, pero los gastos y los costes instalación son mayores. También se puede utilizar este último sistema para efectuar el intercambio con una masa de agua subterránea y captando el agua de un recurso hídrico en los denominados sistemas de circuito abierto lo que proporciona una gran eficiencia, o ubicando las tuberías en la estructura de los edificios como cimentaciones termoactivas. El material más empleado en las sondas es el polietileno de alta densidad para evitar la corrosión, en forma de U simple, U doble o coaxial.

Para dimensionar una instalación geotérmica es necesario conocer la demanda energética del edificio a partir de las cargas térmicas o de su consumo en climatización, el factor de utilización y las potencias pico de este para seleccionar el modelo de la BCG. También será esencial conocer las propiedades térmicas del terreno y los parámetros del intercambiador enterrado, mediante una estimación o llevando a cabo un test de respuesta térmica (TRT), que consiste en la inyección de calor al terreno mediante una perforación para conocer su comportamiento al estabilizarse con el tiempo y poder determinar estas características con exactitud. Por último, es preciso seleccionar una correcta configuración de los intercambiadores en cuanto a disposición y medidas métricas, con tal de obtener la mayor eficiencia al menor coste posible.

A la hora de poner en marcha la ejecución de un sistema geotérmico, se realizarán las perforaciones o zanjas pertinentes para los intercambiadores, el montaje de los colectores y los equipos correspondientes a la sala de máquinas y el circuito de distribución. Estos lo componen la bomba de circulación si no está incluida en la BCG, el depósito de ACS, un vaso de expansión para mantener la presión, un purgador, y los filtros, válvulas y manguitos antivibratorios pertinentes. También será vital realizar las siguientes pruebas en el circuito: una purga del aire en la instalación, y pruebas de estanqueidad y presión con tal de impulsar el caudal necesario para vencer las pérdidas hidráulicas. Por último, se ha de disponer de monitorización en la instalación, mediante instrumentos de medida de variables como el caudal, la temperatura y la presión en la instalación, para lograr un funcionamiento correcto y sostenible.



Fig. 2.2- Ejemplo de instalación tipo. (Fuente: Ecoforest)

Las instalaciones geotérmicas someras de circuito cerrado vertical vienen reguladas por la norma: “UNE 100715-1 Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical”. Esta marca su diseño en función del tipo de instalación según el tamaño y a partir de los parámetros de la BCG y la edificación, así como todos los aspectos mencionados en los párrafos anteriores con respecto a la ejecución de la obra. Se requerirá de una caracterización precisa de todas las variables que influyen en el diseño de un sistema, como son la demanda energética, el terreno, las condiciones de funcionamiento de la bomba de calor y toda la instalación hidráulica. Además, la norma contiene todo lo referido a las perforaciones y zanjas que se llevarían a cabo, junto a los planos, certificaciones y tramitaciones pertinentes. También recoge las acciones requeridas para una monitorización y mantenimiento adecuado de la instalación, y toda la documentación necesaria de la misma [8].

Como conclusión, la situación de la geotermia somera se encuentra poco desarrollada en nuestro país con respecto a otros en Europa, donde se ha consolidado como alternativa. Esto es debido a la escasa formación y conocimiento, pues este recurso se encuentra ampliamente disponible al no precisar de condiciones extraordinarias del terreno, posee la capacidad de integrarse arquitectónicamente y junto a otras fuentes de energía, y precisa de un mantenimiento escaso. Además, la climatología de España beneficia a esta tecnología para su uso en calefacción y refrigeración [9].

3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

El diseño de intercambiadores de calor enterrados en vertical es complicado debido a la cantidad de factores que intervienen, pues es necesario que sean identificados correctamente y con exactitud para que no afecten a la eficiencia térmica del conjunto. Para un cálculo correcto, se requiere hallar la composición geológica y las propiedades térmicas del terreno en el que se pretende actuar y las características del intercambiador de calor enterrado (en inglés Borehole Heat Exchanger o simplemente BHE). Igualmente, depende del comportamiento del fluido caloportador en el intercambiador, los datos de funcionamiento y consumo de la BCG y el edificio consumidor seleccionados, y un posible desbalance térmico provocado por la diferencia entre el calor extraído en calefacción y el inyectado en refrigeración. Es por ello, que es necesario emplear una metodología válida y adecuada para disponer de la mayor viabilidad posible en nuestro sistema.

La transmisión térmica viene determinada por la ley de Fourier. Fundamentalmente, la transferencia de calor en el terreno se da por conducción y en menor medida por convección, llegándose a despreciar en las instalaciones someras. Kelvin desarrolló en 1861 el primer modelo matemático que describía el traspaso de calor en intercambiadores enterrados como una fuente lineal infinita y considerando el subsuelo como un medio homogéneo a una temperatura constante (Kelvin Line Source Theory) [10]. Esta teoría fue ampliada por Ingersoll y Plass (1954) [11] en base a las ecuaciones de la transferencia de calor para una fuente cilíndrica enterrada de Carslaw y Jaeger (1947) [12], obteniendo la distribución radial de la temperatura en el intercambiador en función de la temperatura del terreno sin perturbar. En esta última se basa el método IGSHPA del que se va a hacer uso en este trabajo y se va a desarrollar a continuación.

Este modelo emplea el algoritmo desarrollado por Kusada y Achenbach en 1965, siendo una metodología válida y reconocida como aproximación al diseño de instalaciones geotérmicas. En este método la temperatura del terreno dependerá de la profundidad, el día del año y la temperatura ambiental. Se asume que el sistema funciona a carga constante y en las condiciones más desfavorables cuando el consumo es máximo (el mes de enero para calefacción y el mes de julio para refrigeración), por lo que se dimensiona en esta situación para poder cubrir la demanda térmica cuando este alcance su pico [13].

3.2 Ecuaciones de diseño

El modelo de Ingersoll y Plass puede ser aplicado en el diseño de intercambiadores de calor de bucle cerrado con el terreno, como una modificación de la ecuación de transferencia de calor por unidad de longitud en estado estacionario:

$$q_{\text{terreno}} = \frac{L_{\text{BHE}} \times \Delta T}{R_{\text{total}}} \quad (\text{Ec. 3.0})$$

Donde:

- q_{terreno} = calor transferido desde/hacia el terreno (W).
- L_{BHE} = longitud del pozo que contiene el intercambiador de calor enterrado (m).
- ΔT = Diferencia de temperatura entre el terreno y la del fluido en el intercambiador (°C).
- R_{total} = Resistencia térmica conjunta del terreno y el BHE (m*K/W).

Las bombas de calor posibilitan transferir el calor de un foco frío a uno caliente, sirviéndose de un consumo eléctrico por parte del compresor relativamente menor. Como ya se ha comentado, una BCG extrae el calor del terreno para introducirlo en el interior en modo calefacción y al contario, para inyectarlo en el terreno en modo refrigeración. El COP (Coeficiente of performance) se define como la razón entre la potencia calorífica/frigorífica y el consumo de la bomba. El menor salto térmico entre el terreno y las temperaturas de impulsión, con respecto al que habría con la ambiental, posibilita alcanzar una mayor eficiencia al ser menor el gasto eléctrico necesario. El intercambio de calor con el terreno se puede calcular en función de la eficiencia del equipo y la carga térmica del conjunto de edificios: [14]

$$\frac{q_{\text{iny}}}{q_{\text{refrig}}} = \frac{COP_{\text{refrig}} + 1}{COP_{\text{refrig}}} \quad (\text{Ec 3.1 refrigeración})$$

$$\frac{q_{\text{ext}}}{q_{\text{calef}}} = \frac{COP_{\text{calef}} - 1}{COP_{\text{calef}}} \quad (\text{Ec 3.1 calefacción})$$

Donde:

- $q_{\text{refrig}}/q_{\text{calef}}$ = carga térmica de diseño de la edificación en refrigeración/calefacción respectivamente (W).
- $q_{\text{iny}}/q_{\text{ext}}$ = calor inyectado/extraído en el terreno en cooling/heating respectivamente (W).
- $COP_{\text{refrig}}/COP_{\text{calef}}$ = Eficiencia energética de la BCG en refrigeración/calefacción .

Se entiende que el calor captado por el terreno será en torno al 125% (COP=4) superior a la capacidad frigorífica de la bomba de calor, pues la potencia eléctrica del compresor se transforma en potencia térmica. De igual modo, el calor disipado será en la misma medida, inferior a la capacidad térmica de la bomba en calefacción.

En base a la Ec. 3.0, se desarrollan las ecuaciones para el cálculo de la longitud de los intercambiadores en calefacción y refrigeración según el método IGSHA, para los meses en los que la demanda es máxima. El flujo de calor vendrá determinado por los requisitos térmicos del edificio y la resistencia térmica dependerá de las propiedades del terreno, el diseño del intercambiador y el ratio de tiempo en el que hay transferencia de calor. La temperatura del terreno se mantendrá constante durante el año, por lo que la temperatura dentro del intercambiador será la variable de diseño para la optimización en la longitud y el coste de la instalación. Así, las ecuaciones de diseño para los intercambiadores de calor toman la siguiente forma: [5]

$$L_{refrig} = \frac{q_{refrig} \left(\frac{COP_{refrig} + 1}{COP_{refrig}} \right) \times (R_{BHE} + R_{terreno} \cdot F_{refrig})}{\left(\frac{T_{ent_{int}} + T_{sal_{int}}}{2} \right) - T_{terreno}} \quad (Ec. 3.2 \text{ Refrigeración})$$

$$L_{calef} = \frac{q_{calef} \left(\frac{COP_{calef} - 1}{COP_{calef}} \right) \times (R_b + R_{terreno} \cdot F_{calef})}{T_{terreno} - \left(\frac{T_{ent_{int}} + T_{sal_{int}}}{2} \right)} \quad (Ec. 3.2 \text{ Calefacción})$$

Donde:

· L_{refrig}/L_{calef} = Longitud total de diseño del BHE (m).

· q_{refrig}/q_{calef} = carga térmica de diseño de la edificación en refrigeración/calefacción respectivamente (W).

· COP_{refrig}/COP_{calef} = Eficiencia energética de la BCG en refrigeración/calefacción .

· R_{BHE} = Resistencia térmica global del BHE (m·K/W).

· $R_{terreno}$ = Resistencia térmica estacional del terreno que rodea el BHE (m·K/W).

· F_{refrig}/F_{calef} = Factor horario de utilización durante los meses de diseño en refrigeración/calefacción.

· $T_{terreno}$ = Temperatura media del terreno (°C).

· $T_{ent_{int}}$ = Temperatura de entrada del fluido al BHE en las condiciones de diseño (°C).

· $T_{sal_{int}}$ = Temperatura de salida del fluido al BHE en las condiciones de diseño (°C).

Las ecuaciones anteriores asumen que la temperatura en el terreno a las profundidades en las que se transfiere el calor se mantiene constante con el paso de los años. Esto es correcto si se cumple que la cantidad de calor extraído e inyectado son similares, es decir, que la carga térmica en el terreno está balanceada.

En el caso de que exista un desbalance energético en el terreno ya sea por una mayor demanda térmica en calefacción o refrigeración, se producirían variaciones en la temperatura del terreno para la cual diseñamos el sistema, por lo que las temperaturas en el intercambiador se podrían encontrar por debajo o por encima de los límites establecidos para los meses de diseño, disminuyendo así la eficiencia del conjunto. En cualquier caso, el desbalance requeriría de una mayor área de transferencia, que puede ser lograda mediante un aumento del espaciado entre los pozos o, como se muestra a continuación, por un aumento en la longitud de diseño.

Se define un factor de corrección sobre las longitudes calculadas para ajustar el desbalance en el terreno. Este multiplicador se basa en la carga anual neta transferida al terreno entre calefacción y refrigeración, y en función de cuál de estas es la dominante. El balance anual normalizado se obtiene de la siguiente forma: [5]

$$Balance_{refrig} = \frac{En_{refrig} - En_{calef}}{L_{refrig} \left(\left(\frac{T_{ent_{int}} + T_{sal_{int}}}{2} \right) - T_{terreno} \right)} \quad (Ec. 3.4 \text{ Refrigeración})$$

$$Balance_{calef} = \frac{En_{calef} - En_{cooling}}{L_{calef} \left(T_{terreno} - \left(\frac{T_{ent_{int}} + T_{sal_{int}}}{2} \right) \right)} \quad (Ec. 3.4 \text{ Calefacción})$$

Donde:

• **Balance** = Carga anual neta intercambiada con el terreno (kWh/m·K).

• **En_{refrig/calef}** = Carga anual energética de diseño intercambiada con el terreno (captada/disipada) (kWh).

El factor multiplicador se obtiene a partir de una gráfica parametrizada en función del balance [5]. Este se aplicará sobre la longitud en el modo de climatización frío o calor, cuya diferencia entre cargas resulte positiva. Es decir, si el balance resulta positivo se tendría que aplicar el factor de corrección sobre ese modo, y se entiende que si el balance es negativo este factor se toma como la unidad.

Al disponer de los mismos pozos para cubrir la demanda de calefacción y refrigeración, para evitar el desbalance se deberá tomar como longitud total del intercambiador enterrado, el máximo entre los valores corregidos.

$$Long \text{ Total intercambiador} = \text{Máx}(Long_{IntercCorregidaCalef}, Long_{IntercCorregidaRefrig}) \quad (Ec. 3.5)$$

3.3 Pasos

En este apartado se muestran los puntos a seguir en este proyecto para el diseño de intercambiadores verticales de bucle cerrado:

1. Características energéticas del edificio seleccionado: consumo, equipos y horario de uso. Definir la carga térmica en calefacción/refrigeración y su factor de utilización en los meses más críticos, la transferencia anual de calor con el terreno y la potencia pico.
2. Selección de la BCG en función de las temperaturas de impulsión y las máximas y mínimas en el intercambiador. Obtención del COP y el caudal circulante.
3. Determinar la temperatura del subsuelo en las profundidades requeridas.
4. Estimar las propiedades térmicas del terreno (conductividad térmica) donde se lleva a cabo la instalación.
5. Selección del fluido caloportador y obtener sus propiedades, en base a la temperatura mínima en el intercambiador.
6. Seleccionar las características del pozo geotérmico: Diámetro del pozo y de la tubería, el coeficiente dimensional normal (SDR), configuración de la sonda, separación entre ellos y la conductividad del relleno. Se debe garantizar un régimen turbulento en el intercambiador.
7. Obtener la resistencia térmica conjunta del BHE teniendo en cuenta las propiedades anteriores.
8. Calcular la longitud de diseño de los pozos tanto en calefacción como en refrigeración.
9. Ajustar las longitudes debido al desbalance si es necesario. Sobre esta longitud final se adquiere el número de perforaciones.
10. Revisar el diseño para encontrar posibles optimizaciones a efectuar en base a las distintas variables, para tratar de alcanzar la mayor rentabilidad económica y energética.

Para finalizar, es necesario calcular el coste que se destinaría a la perforación del terreno, estimar el coste total del equipo en la instalación y obtener los costes de explotación en el periodo de tiempo de uso (consumo energético). También se calculan los ahorros logrados en base al nuevo rendimiento estacional del equipo.

4. DISEÑO DEL SIMULADOR

Para facilitar el uso y comprobación de la metodología descrita anteriormente, esta se ha implementado una interfaz gráfica que permita a un usuario introducir y modificar las variables de un caso de aplicación y visualizar los resultados obtenidos con la misma. Para agilizar su diseño e implementación se ha decidido usar Matlab, en concreto el complemento AppDesigner. Para mostrar el funcionamiento de esta aplicación, se muestra el siguiente diagrama:

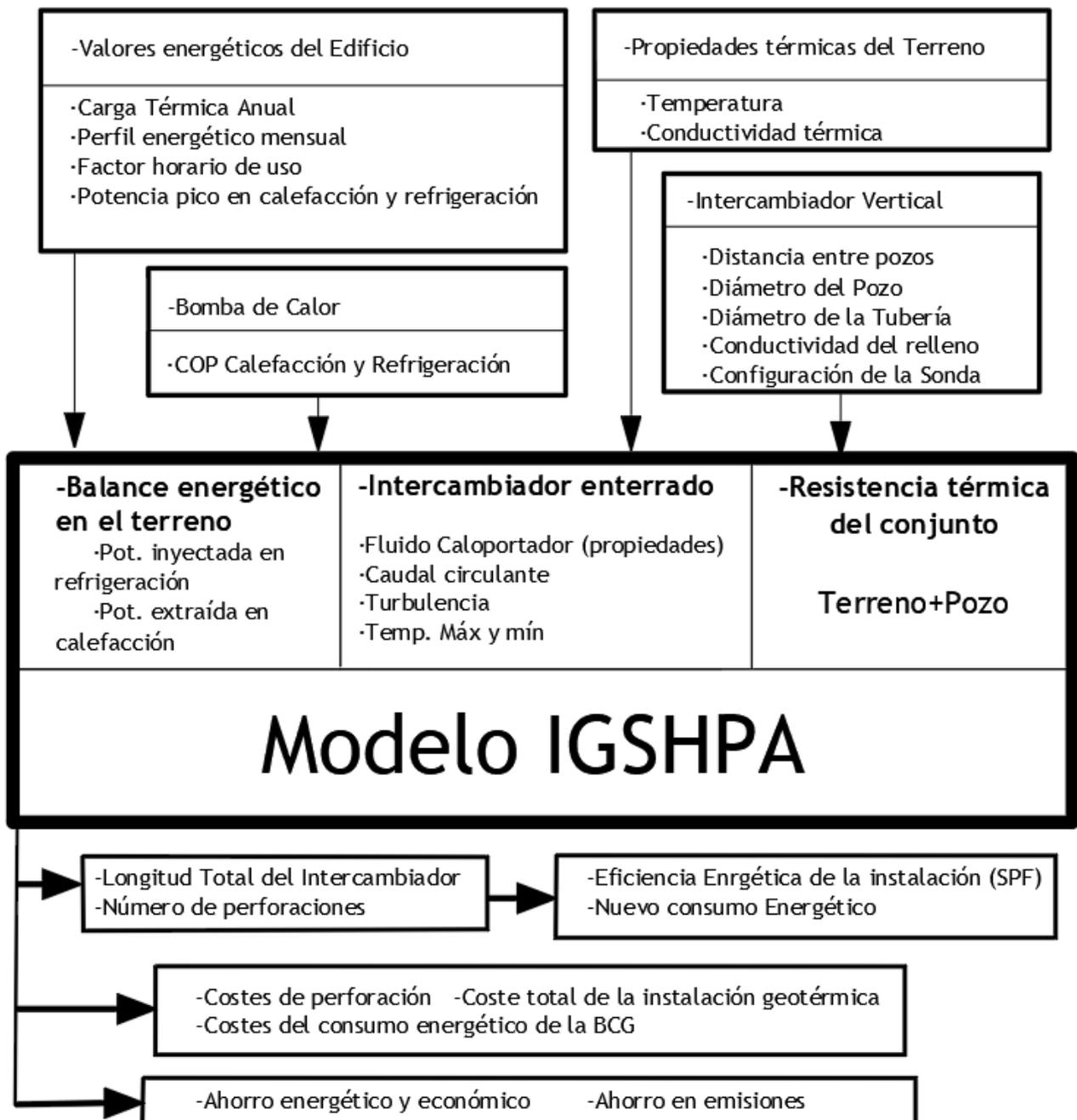


Fig. 4.1 Flujo de trabajo de la aplicación

4.1 Datos de entrada

A continuación, se enumeran todas las entradas a introducir en la aplicación, requeridas en la elaboración del diseño de las instalaciones de BCG sobre los edificios de la UPV. Se describe detalladamente en cada uno el proceso de obtención y las distintas opciones de las que se dispone.

-Edificio consumidor

Se dispone de los datos de consumo de gran parte de los principales bloques de edificios del campus de Vera de la UPV (Escuelas, Entidades, Servicios...). Se tomarán los valores correspondientes a los 12 meses del año 2019, como último año donde estos están normalizados y se consideran realistas, dados los hechos acontecidos desde este punto hasta principios del curso 22/23, que da comienzo este proyecto.

Estos se emplean como base de datos del programa y, a partir de la proporción mensual correspondiente a climatización, definida en el documento elaborado por Vicerrectorado de Desarrollo Sostenible de los Campus: "Consumos y gastos energéticos en la UPV", se obtienen las demandas térmicas en calefacción y refrigeración [3].

Sobre los consumos eléctricos mensuales, se aplica el porcentaje destinado a climatización en función de cada mes. Para obtener la demanda térmica anual, se asume un rendimiento estacional medio (SPF) por defecto en el conjunto de los equipos consumidores de la UPV de 2,5 para calefacción y 2,0 en refrigeración, suponiendo que no se emplean combustibles fósiles. Para las potencias pico en ambos modos y que se emplearán en los cálculos, se considera en los meses de enero y julio, un uso de 7 y 10 horas diarias respectivamente para mantener el confort térmico en las estancias. De aquí se puede calcular factor de utilización en porcentaje durante cada mes en base a la carga pico.

-Temperatura del terreno

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el modelo IGSHPA la temperatura es un factor que depende de las características del terreno, la profundidad a la que se perfora y las condiciones térmicas en el exterior. Hasta los 10-15 metros, la temperatura del terreno viene determinada por la radiación solar, pero esta se mantiene constante desde este punto hasta aproximadamente 100 metros, donde ya se establece un gradiente geotérmico. Asumiendo que el suelo es homogéneo y cuyas propiedades térmicas son constantes, para profundidades propias de un intercambiador geotérmico se puede calcular la temperatura del terreno en función de la profundidad y el día del año. Derivando de la ecuación general, para los días más críticos que condicionarán el diseño de la instalación, se definen las ecuaciones para obtener la temperatura máxima y mínima en el año.

$$T(z)_{Max, Min} = T_M \pm A_s * e^{\left(-z * \sqrt{\frac{\pi}{365 \text{días} * 24 \text{h} * 3600 \text{s} * (\alpha)}}\right)} \quad (Ec. 4.1)$$

Donde:

- z = Profundidad del terreno (cm).
- T_M = temperatura media del terreno a una profundidad donde no se percibe la oscilación térmica. Asumir como la temperatura seca media anual de la localización (°C).
- A_s = Oscilación térmica en la superficie. Se obtiene como la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima anuales (°C).
- α = Difusividad térmica del terreno (cm²/s).

Esta ecuación carece de sentido de aplicación en intercambiadores verticales, pues a partir de unos 15 metros de profundidad la exponencial tiende a cero. Por lo tanto, se admite que la temperatura en el terreno es constante durante todo el año a las longitudes de diseño, y que esta es igual a la media ambiental del lugar durante el año, tomada como 18°C en la ciudad de Valencia [15] (Anexo 3.1).

-Conductividad térmica del terreno

La capacidad de conducir el calor que tiene el terreno varía en función del material que lo conforma. Debido a la variedad de componentes que encontramos al perforar y que alternan en función de la profundidad, es difícil determinar con exactitud la resistividad térmica del terreno. Para convertir la información geológica en valores concretos para las propiedades del terreno, nos podemos apoyar en tablas o mapas como estimación de estas [4] [16] . Para datos más precisos sería necesario invertir en la realización de un TRT para estudiar el comportamiento real del subsuelo.

En estudios realizados sobre la propia UPV [17], el valor exacto de la conductividad térmica del terreno se estima en 2,3 W/mK. La resistencia térmica que existe entre las perforaciones se calcula a partir del dato anterior y en función de las medidas de estas, a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{terreno} = \frac{\ln\left(\frac{Dist_b}{D_b}\right)}{2\pi * K_t} \quad (Ec. 4.2)$$

Donde:

- $R_{terreno}$ = Resistencia térmica del terreno (mK/W).
- $Dist_b$ = Distancia entre pozos o el diámetro de terreno que rodea al BHE (m).
- D_b = Diámetro del BHE (m).
- K_t = conductividad térmica del terreno que rodea al pozo (W/mK).

-Fluido caloportador

El fluido que circula por el intercambiador enterrado viene marcado por la temperatura mínima que se da en el BHE para las condiciones más críticas en calefacción. Se emplea principalmente agua, salvo que la temperatura a la salida del evaporador rebase los 5°C aproximadamente. Para estos casos, se utiliza una solución de agua con un porcentaje de glicol como anticongelante (etilenglicol/propilenglicol), que permita disminuir el punto de congelación del fluido caloportador. También se podría requerir un anticongelante para un elevado uso en calefacción.

La temperatura media del fluido en el intercambiador en ambos modos se estima a partir de la temperatura en el terreno. Para calefacción esta se ha tomado por defecto en 7.5°C y 32.5°C en refrigeración en Valencia ciudad. La temperatura de entrada al intercambiador en calefacción es la que determina la elección, y esta depende del salto térmico que se pretenda obtener en el intercambiador.

Las propiedades del fluido caloportador agua/propilenglicol/etilenglicol, se obtienen en función de la temperatura de salida de la BCG hacia el terreno [18] (Anexo 3.2).

-Características Intercambiador

Lo primero es determinar la configuración en la que se disponen los intercambiadores en el terreno. Como se sabe, estos se colocarían verticalmente en perforaciones, para un sistema de flujo ida/retorno en paralelo. La forma de U es la más empleada en las sondas geotérmicas, por lo que en la configuración de esta se podrá seleccionar entre “Simple U”, “Simple U espaciada” y “Double U”.

Para las perforaciones, la separación entre ellas para evitar interferencia térmica oscila entre los 4-8 metros. El diámetro del BHE se escogerá entre 100, 125 o 150 (Double U) mm. Como relleno del pozo (“grouting”) se suele emplear recetas de cemento o bentonita de sodio (posibles composiciones en anexo 3.4), cuya conductividad varía entre 0,7-2,1 W/mK aproximadamente. Se intenta que este valor sea similar al de la conductividad térmica del terreno que se escogió.

Como sonda se emplean tuberías de polietileno de alta densidad y SDR 11. Entre los diámetros a escoger, se seleccionará entre 25, 32 y 40 mm, en función del que habilite un mejor comportamiento del fluido en cuanto a turbulencia, para favorecer el traspaso térmico en el intercambiador.

-Resistencia térmica del Intercambiador vertical enterrado

La resistividad en conjunto del BHE (pared + relleno+ tubería), depende de todos los factores mencionados en el apartado anterior. A partir de una tabla parametrizada se obtienen los valores de la resistencia térmica (mK/W) tabulados, en función del diámetro de la sonda y del pozo, la configuración de la tubería, la conductividad del terreno y número de Reynolds [14] (Anexo 3.3).

-BCG y condiciones de operación

Para garantizar el intercambio de calor con el terreno, se define un salto térmico en el intercambiador. Este valor que debe rondar los 3-5°C, se aplica en la temperatura media en el intercambiador para marcar la de salida de la bomba hacia el pozo. En base a la diferencia de temperaturas escogida, se calcula el caudal a impulsar al terreno requerido para cumplir esta condición. También se puede adquirir la temperatura de salida del intercambiador enterrado a partir de la ecuación de transferencia de calor por cantidad de masa:

$$\dot{m} = Dens * Q = \frac{q_{iny/extr}}{(\Delta T * Cp)} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$T_{sal\ Refrig} = T_{ent\ refrig} - \frac{q_{iny}}{Cp * Q * Dens} \quad T_{sal\ Calef} = T_{ent\ calef} + \frac{q_{extr}}{Cp * Q * Dens}$$

Además, se define un número de Reynolds (Re) mínimo como límite, para garantizar un régimen turbulento y favorecer el intercambio. En caso de que este no se cumpla, se variaría el diámetro de la tubería.

$$Re = \frac{Dens * D_{int\ Tube} * Vel}{\mu} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

- \dot{m} = Caudal másico total circulante por la instalación (kg/s).
- Q = Caudal total del fluido circulante seleccionado (m³/s).
- $Dens$ = Densidad del fluido a la temperatura de diseño (kg/m³).
- Cp = calor específico del fluido a la temperatura de diseño (J/kgK).
- ΔT = Diferencia entre la temperatura de entrada y salida al intercambiador en refrigeración y calefacción (°C).
- $q_{iny/extr}$ = Calor intercambiado con el terreno obtenido a partir de la Ec. 3.1 (W).
- μ = Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de diseño (kg/m*s).
- $D_{int\ Tube}$ = Diámetro real de la tubería obtenido a partir del SDR y que marca el área (m).
- Vel = Velocidad del fluido en la sonda (m/s).

Para escoger la BCG, se tiene en cuenta la potencia pico del conjunto de edificios. El COP en cada modo se obtiene a partir de la temperatura en el intercambiador, y las temperaturas de impulsión al espacio interior, fijadas en 45°C en calefacción y 7°C en refrigeración. El modelo usado en el simulador es de la marca ecoFOREST la gama ecoGEO+ HP 25-500. Este utiliza tecnología invertir, tiene un amplio rango de modulación, una fácil integración con otros equipos y alcanza una potencia térmica pico de entorno a 100kW.

La eficiencia se obtiene a partir de la siguiente gráfica en función de la temperatura de entrada al BHE. Los valores están parametrizados cuando la velocidad del compresor es máxima y se han fijado a partir de las curvas de funcionamiento del modelo escogido, pues el método IGSHA impone en las condiciones de funcionamiento más críticas [19] (Anexo 3.5).

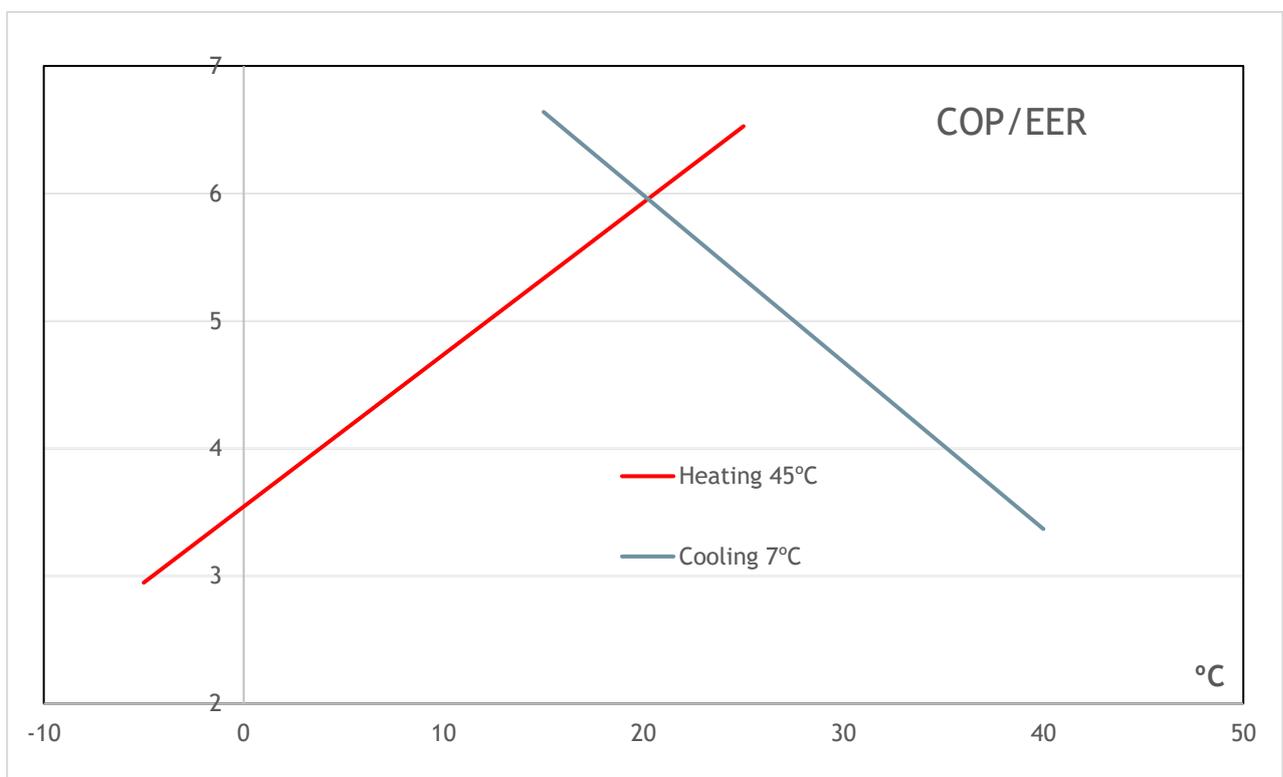


Fig 4.2 COP/ERR BCG

A partir del COP obtenido para las temperaturas en el intercambiador en los meses de diseño, se obtiene la energía captada en refrigeración y disipada en calefacción por el terreno (Ec. 3.1) que, al introducir en la Ec. 3.4 calcula el desbalance a corregir. Mediante esta gráfica, se calcula posteriormente el rendimiento medio estacional en función de las temperaturas dadas en el intercambiador durante el año.

4.2 Resultados

Aplicando los valores de entrada descritos sobre las ecuaciones del modelo de cálculo empleado, se obtendrían los resultados que marcan la disposición de los intercambiadores en el terreno, así como la eficiencia y la viabilidad de las instalaciones.

-Longitud del intercambiador y N.º de perforaciones

Reemplazando los valores necesarios en la Ec. 3.2 y aplicando el factor de corrección por el desbalance a las longitudes obtenidas, la total se obtendrá como el máximo entre el valor obtenido en calor y frío.

Sobre la longitud del intercambiador obtenida, se calculará la longitud final en función del número de perforaciones. Como tamaño por pozo se suelen utilizar sondas de 100 metros, variando la longitud entre 80-150m. Redondeando al siguiente entero, se obtiene los metros totales a perforar y los pozos a realizar.

-Eficiencia

Las bombas de calor se pueden considerar como renovables cuando la producción final de energía supera considerablemente el consumo de energía eléctrica necesario para satisfacer la demanda. Esta suposición la marcará el valor del rendimiento medio estacional, el cual debe ser mayor a 2,5. [20].

Para su cálculo nos apoyaremos en el dimensionado del intercambiador geotérmico, las temperaturas de trabajo del fluido caloportador y empleando las curvas de funcionamiento de la BCG (Fig. 4.2), así como en la distribución mensual del factor de uso y del consumo energético en el año.

Una vez obtenida la longitud final, despejando en la Ec. 3.2 con el valor de la longitud final, se puede obtener la temperatura real que se tendría en el intercambiador en calor y frío. Este parámetro se puede obtener para cada mes del año en función del factor de utilización de cada uno. A partir de la gráfica tabulada se obtiene el punto de funcionamiento de la bomba para cada mes. Aplicando a cada valor el porcentaje de uso correspondiente a cada mes definido por el consumo energético y las horas de uso, se calcula el rendimiento medio anual de la instalación en calefacción (SCOP) y refrigeración (SEER).

-Costes Instalación

Los costes destinados a la elaboración de sistemas geotérmicos de gran tamaño se aproximan a la siguiente distribución:

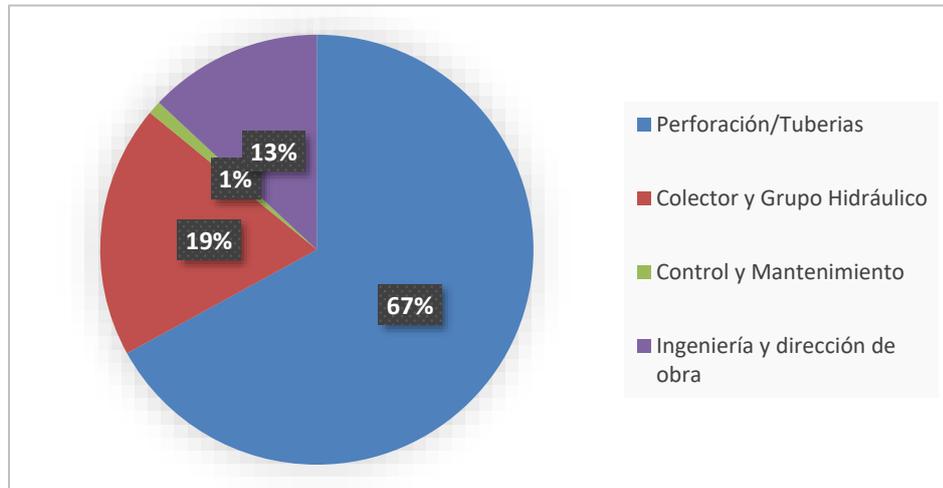


Fig. 4.3 Costes aproximados Geotermia Somera [21]

Para el sobrecoste de la instalación con respecto a una convencional, se escoge un valor por metro de perforación realizado (pozo + relleno + sonda) de 75 €/m. Y como ratio del coste total de la instalación con respecto a la potencia pico, un factor de 1.400 €/kW. Estos valores se han estimado de acuerdo con el documento elaborado por Cheap-GSHPs sobre el coste de instalaciones geotérmicas, pudiendo estos modificarse según se precie. [21].

-Coste Energético

Con la demanda térmica del edificio y la eficiencia calculada en la instalación, se adquiere el nuevo consumo energético necesario para cubrirla. A partir del coste de operación anual referentes al gasto eléctrico de la bomba de calor geotérmica, se pueden calcular los costes totales a lo largo del ciclo de vida de la instalación (LCC) [21].

El coste en el total de años se puede calcular de la siguiente forma:

$$LCC = \text{Coste instalación} + N * \text{Costes operación Anual} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde los costes de operación son el consumo de la BCG multiplicado por el precio de la energía eléctrica actual, y N es el factor que actualiza el valor monetario que depende del número de años (n) y de la tasa de crecimiento anual del interés (i).

$$N = \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

-Ahorro energético

Para los equipos convencionales de climatización se escogió un SPF fijo correspondiente a la media estimada. Con los sistemas geotérmicos a diseñar, el valor que se pretende obtener estará entre 4-5, por lo que como se comentó, el ahorro energético será en torno al 50% y el gasto de la factura eléctrica correspondiente a climatización se reduciría a la mitad.

Este se calcula como la diferencia entre ambos, el consumo real del edificio y el que se tendría con una instalación geotérmica. El ahorro económico dependerá del precio de la electricidad que se vaya a tomar.

-Ahorro emisiones

Al aplicar el factor de emisión (kgCO₂/kWh de En. Final) para la electricidad convencional nacional aprobado por el IDAE [22], se calcula la cantidad de emisiones evitadas a la atmósfera al implementar la medida.

-Análisis de sensibilidad

Consiste en la variación de la longitud total del intercambiador como consecuencia de fluctuar ligera y progresivamente las temperaturas mínimas y máximas en el intercambiador, con el fin de evaluar el cambio en los costes de perforación y el coste energético a lo largo del ciclo de vida en la instalación e inducir una tendencia en su evolución.

Este se realiza con la intención de optimizar el funcionamiento de nuestro sistema geotérmico, en base a obtener el coste total mínimo posible y no incidir en un sobrecoste innecesario. Este se podría dar por un exceso de metros perforados o por una eficiencia energética insuficiente.

A parte de modificar gradualmente los grados centígrados de las temperaturas críticas en el intercambiador, también influirán en este análisis las variables y parámetros de los que dependían los costes previamente nombrados y descritos en los resultados. En una gráfica se mostrará como estos varían en función de la longitud total, centrándonos en la suma de ambos, como el coste total del cual se pretende lograr el mínimo valor.

Finalmente, se compara para las condiciones y variables en las que se diseñó, el resultado que se habría obtenido previamente con el que se logra en la situación óptima, junto al ahorro económico que se generaría.

4.3 Entorno Gráfico

En este apartado se describen las bases para la realización de la aplicación sobre diseño de sistemas geotérmicos de intercambiador vertical cerrado. En esta se implementan las ecuaciones de diseño previamente descritas para obtener los resultados a partir de los argumentos a introducir. Esta se realiza con la intención de simular las medidas a aplicar sobre edificios existentes y poder visualizar de forma gráfica los resultados, y analizar la viabilidad y eficiencia.

El simulador se ha elaborado mediante el complemento de Matlab “App Designer” [23], el cual combina su programación propia con una interfaz gráfica de usuario que permite distribuir componentes visuales como iconos o indicadores con los que interactuar. Estos incluyen casillas y cuadros de opciones que contendrán las variables y resultados a introducir o calcular, así como los botones que ejecuten los procesos correspondientes. Como código, se definen acciones a las posibles interacciones de la aplicación, para que ocasionen cambios internos en el programa o ejecuten las funciones creadas como el esqueleto de este. Estas funciones que ejecutan los cálculos a partir de las operaciones y realizan las lecturas de datos requeridas, se encuentran almacenadas como archivos .m que contienen el modelo matemático a implementar.

Como base de datos, se almacenan mediante tablas en archivos .mat los valores correspondientes a las características energéticas de los edificios de la UPV y los perfiles mensuales de consumo. También, se dispone de la tabla correspondiente a las propiedades del fluido caloportador (Anexo III), la correspondiente a la resistencia térmica del BHE (Anexo III), y la tabla con los valores parametrizados del punto de funcionamiento de la BCG (Fig. 4.2). En estas los valores se obtienen por interpolación a partir de las opciones tabuladas.

Como forma de organización, se emplean “Group Tabs” que contengan la metodología distribuida en secciones sobre pasos concretos y de forma ordenada para su correcto funcionamiento. Estos estarán estructurados mediante paneles con cada apartado más específico, y se completarán de arriba a abajo siendo necesario la cumplimentación de todos para poder avanzar a la siguiente diapositiva.

Los inputs se introducen al modificar las casillas correspondientes o seleccionando entre distintas opciones disponibles, condicionando los valores obtenidos al estar interconectados. Para estos, se han establecido valores límites para evitar datos anómalos y se permitiría o no su modificación. Una vez marcados, los resultados se autocompletarán al pulsar el botón accionador pertinente. Además, se indican las unidades de cada parámetro y se emplean imágenes para ayudar a la comprensión del proceso.

Interfaz de Usuario

A continuación, se definen cada una de las pestañas de la aplicación para asistir al usuario en el uso de la simulador, y mostrar todas las posibilidades y acciones a realizar para la obtención de los resultados. Se justifica en cada momento si cada parámetro se adquiere mediante cálculo, a partir de la base de datos o si se debe introducir como entrada y su forma de obtención de ser así.

Los “tabs” que componen el simulador, se enumeran seguidamente en el orden en el cual deben ser ejecutados para una correcta experiencia en su uso. No se recomienda avanzar entre ellos desde el menú superior a no ser que se haya finalizado la simulación, debiéndose emplear los botones que indiquen el avance a la siguiente pantalla.

1. Menú Principal
2. Selección Edificios
3. Demanda térmica
4. Propiedades del terreno
5. Propiedades del intercambiador geotérmico
6. Condiciones de operación
7. Resultados de diseño
8. Costes
9. Ahorros
10. Análisis de sensibilidad
11. Resumen de resultados

Se dividen de tal modo, que cada pestaña trate cada parte del proceso específicamente para evitar saturar de información e interacciones al usuario y dar lugar a posibles confusiones, además de permitir modificar cada parámetro sin influir de forma definitiva en los resultados finales, comprobando así detalladamente el efecto de cada variación en estos y tomar la decisión más conveniente.

Al ejecutar el archivo .mlapp, aparece de forma apaisada la ventana correspondiente a la aplicación y se muestra por pantalla el menú principal del simulador. Para enseñar la interfaz de usuario, la descripción que a continuación se redacta sobre el funcionamiento de la aplicación, se realiza conjunto a un ejemplo para ayudar a su entendimiento.

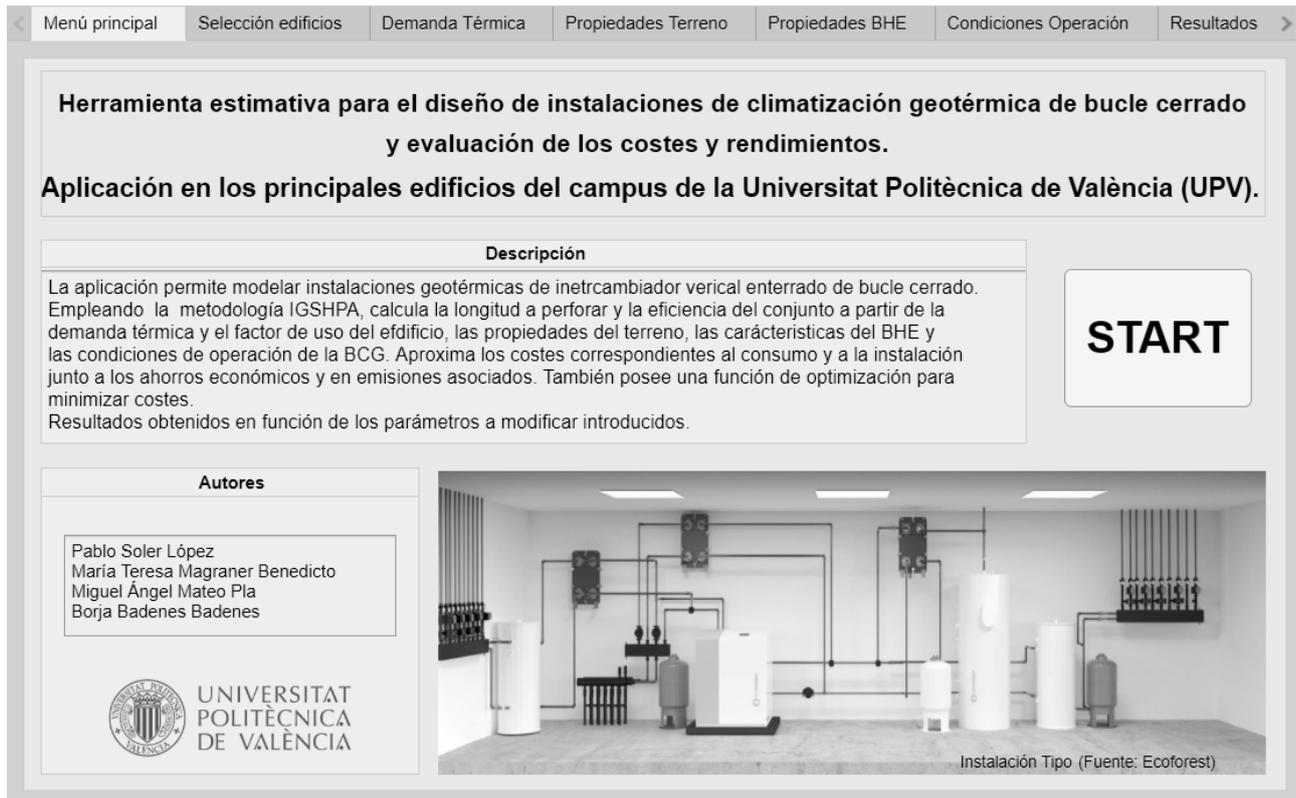


Fig. 4.3-1 Tab: Menú principal

Esta muestra la función principal del programa a modo de título, acompañado de una breve descripción de la aplicación y la metodología empleada, junto a los nombres de los autores de la herramienta. Arriba se muestra los grupos de paneles existentes, destacando el cual en el que nos encontramos. Al accionar el botón “START” se dará paso a la siguiente pestaña para comenzar el diseño del sistema geotérmico.

En principio, la idea del simulador surge para implementarlo en los bloques de edificios con mayor consumo energético del campus de Vera de la UPV. Pese a esto, también se permite al usuario implementarlo en cualquier edificio de la ciudad de Valencia del que se conozca su demanda térmica, pues los valores por defecto de las propiedades térmicas y el perfil de uso en calor y frío se corresponden a esta localización, pero modificando estos correctamente harían factible su uso en cualquier territorio del país.

Es por ello que, en la pestaña de selección de edificios, encontramos la primera elección entre dos opciones en cuanto al modo de uso del simulador, marcar uno del conjunto de edificios de la UPV disponibles de los que se conoce sus características o escoger un edificio distinto a estos del que se introducirán sus valores en adelante. Al escoger entre el conjunto de edificios, se activa el botón para confirmar la opción.

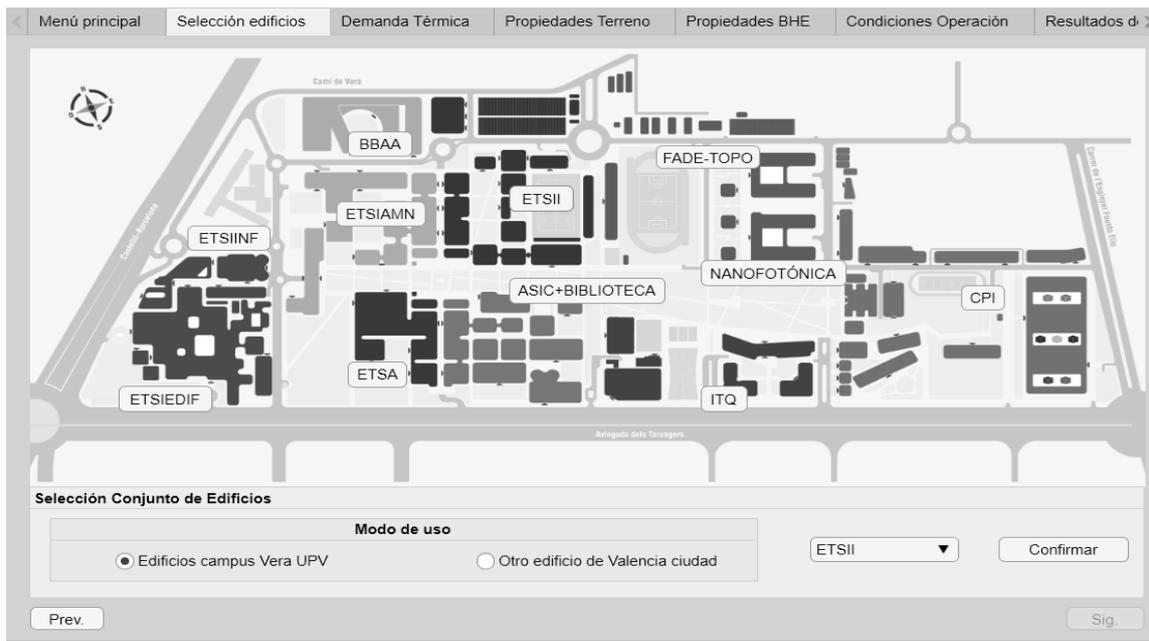


Fig 4.3-2.1 Tab: Selección de edificios

En el primer caso, se opta por un conjunto de los que aparecen en el plano de la UPV pulsando en el botón que corresponde con su ubicación o buscando en el listado que aparece junto botón de confirmar. Marcando el otro modo, se ajustará automáticamente el valor seleccionado impidiendo su modificación.



Fig. 4.3-2.2 Tab: Selección de edificios

Al presionar el botón confirmar, se almacena el conjunto/edificio seleccionado y se activa el botón en la esquina derecha que permitirá cambiar a la siguiente diapositiva en la que se definirán los valores energéticos de la estructura. Es necesario confirmar cada vez que se varíe la elección.

Como conjunto seleccionado aparece la opción marcada anteriormente. Los valores por completar se corresponden a la potencia pico en kilovatios, la demanda térmica anual y el perfil mensual en megavatios hora, y las horas de uso al año y el factor de uso en los meses críticos, en calefacción y refrigeración. La demanda de ACS en principio no computa en las entidades definidas de la UPV. Al pulsar en obtener valores, se completarán automáticamente todos los valores, cargándolos a partir de la base de datos creada y permite el paso a la siguiente viñeta.

Conjunto Seleccionado

ETSII

Valores de Consumo por defecto

	Calefacción	Refrigeración
Pot. Pico (kW)	<input type="text" value="521.13"/>	<input type="text" value="413.71"/>
Carga Base anual (MWh)	<input type="text" value="445.5"/>	<input type="text" value="533.7"/>
Nº horas anuales	<input type="text" value="855"/>	<input type="text" value="1290"/>
Factor uso mes de diseño	<input type="text" value="0.29"/>	<input type="text" value="0.42"/>

Consumo Anual ACS (kWh)

Energía Mensual (MWh)

	Calor	Frío
Enero	<input type="text" value="113.1"/>	<input type="text" value="0"/>
Febrero	<input type="text" value="99.1"/>	<input type="text" value="0"/>
Marzo	<input type="text" value="74.46"/>	<input type="text" value="0"/>
Abril	<input type="text" value="27.8"/>	<input type="text" value="9.531"/>
Mayo	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="41.35"/>
Junio	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="96.26"/>
Julio	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="128.3"/>
Agosto	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="16.66"/>
Septiembre	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="133.8"/>
Octubre	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="107.9"/>
Noviembre	<input type="text" value="52.18"/>	<input type="text" value="0"/>
Diciembre	<input type="text" value="78.92"/>	<input type="text" value="0"/>

Prev. Sig.

Fig. 4.3-3.1 Tab: Demanda térmica

En caso de seleccionar un edificio distinto, se tendría que completar la demanda en climatización a partir de una estimación de la factura energética o mediante las cargas térmicas, completando las casillas correspondientes. El resto de los valores se rellenarán en función del perfil horario de consumo. También existe la posibilidad de adquirir estos automáticamente pulsando en calcular por defecto, si se estima una distribución del consumo mensual y un horario de uso de los sistemas de climatización similar a los bloques de la UPV, o como es el caso, de edificios del sector terciario en la ciudad de Valencia.

En ambos modos de uso de la aplicación, se podría modificar la carga energética a partir de los valores mensuales o directamente del total anual. También se permitiría variar las potencias pico y el número de horas anuales editando el factor de uso en el mes de diseño. En caso de que al modificar uno de estos valores se obtengan parámetros anómalos en una casilla con respecto al resto, aparecería un mensaje de aviso. El botón reset reiniciará las casillas a cero, en caso de cambiar de elección en la pestaña previa o de recibir una advertencia.

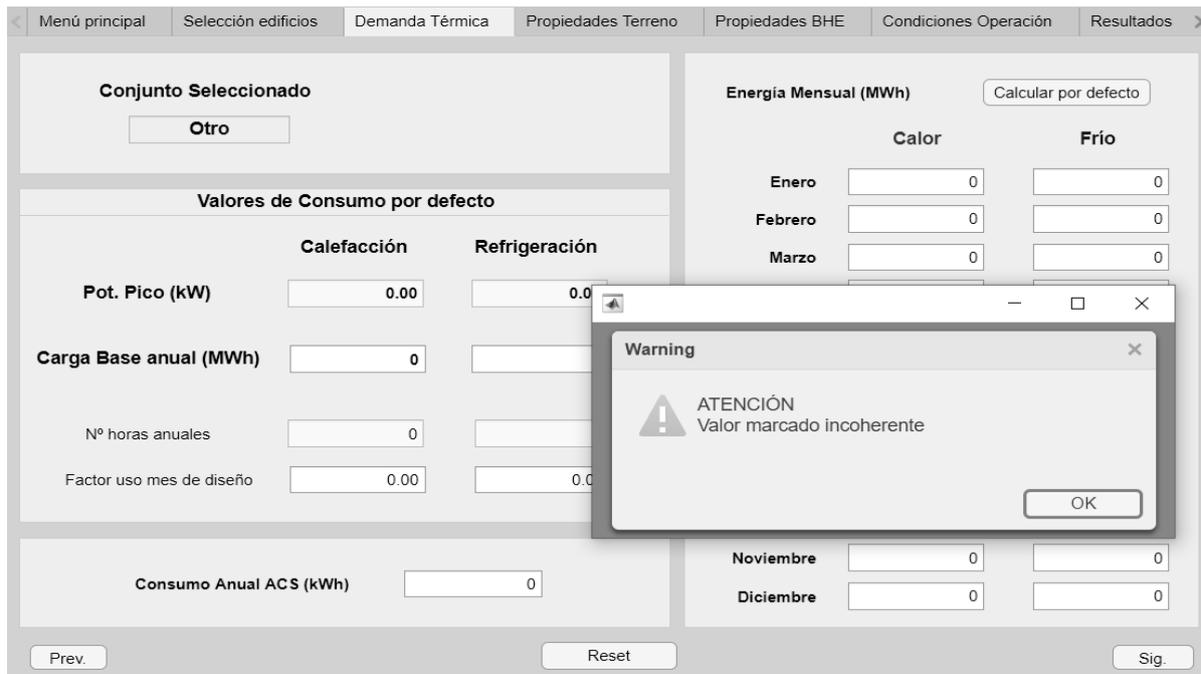


Fig. 4.3-3.2 Tab: Demanda térmica

En la siguiente pantalla se definen las propiedades térmicas del terreno en el que se simulará la instalación. La temperatura del terreno a las profundidades de diseño se estima como la temperatura media ambiental en un año (Ec. 4.1), calculada como 18°C en Valencia capital (Anexo 3.1) [15]. Para la conductividad térmica del terreno se podrá marcar el valor por defecto calculado en su momento en las estancias de la UPV de 2,3 W/mK [17], o si se marcó otra localización del edificio se permitirá al usuario variar este en función de la composición geológica del terreno en el que se halle.



Fig. 4.3-4 Tab: Propiedades del terreno

Posteriormente, se fijarían las características del pozo geotérmico, conformado por el BHE, el relleno y la sonda. Al usuario se le permite escoger entre las opciones marcadas o dentro del rango disponible. Estos valores determinarán la resistencia térmica del conjunto terreno y pozo, y las condiciones en las que circularía el fluido por las tuberías. Cada variable se agrupa en paneles distintos y se emplean imágenes para ayudar a la identificación de estas.

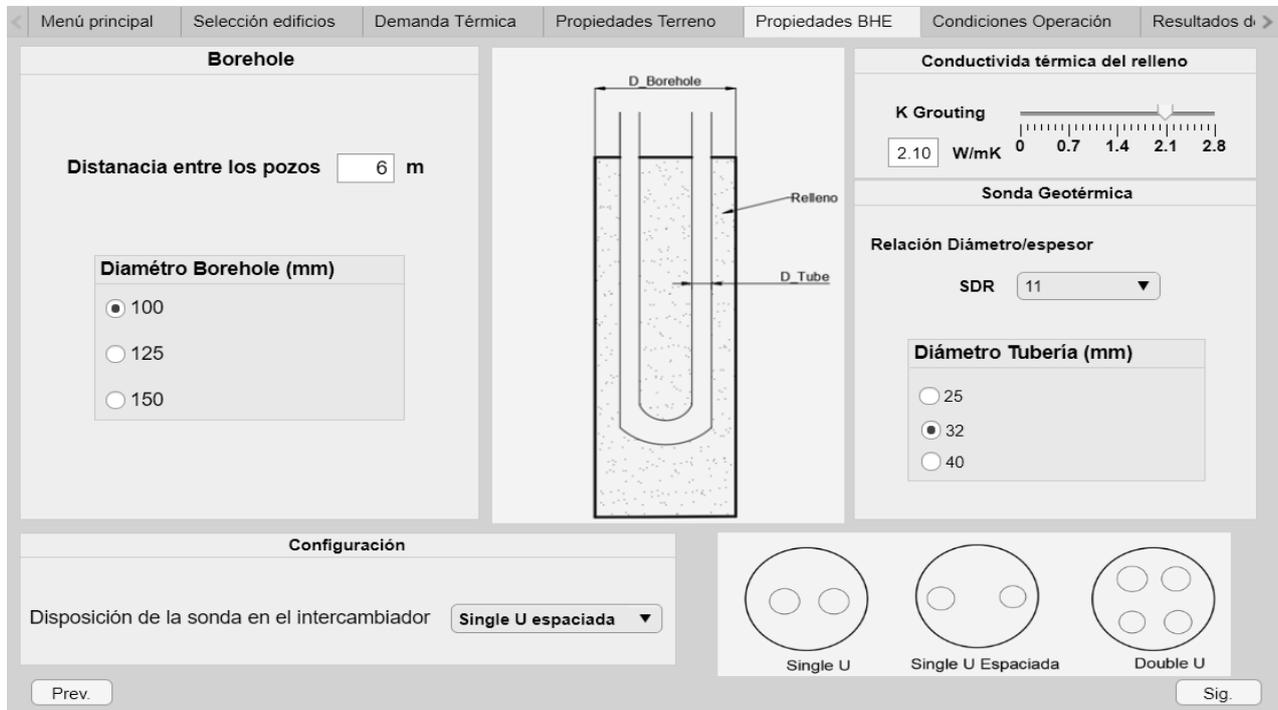


Fig. 4.3-5 Tab: Propiedades del BHE

En la parte izquierda se determinan las características del pozo. Se establece la distancia entre cada perforación y se selecciona entre uno de los diámetros disponibles para el BHE. Estos parámetros junto a la conductividad del terreno previamente escogida marcarán la resistividad térmica del subsuelo.

En la esquina superior derecha se fija la conductividad del material que se empleará como relleno. Se recomienda que este valor sea similar al de la conductividad térmica del terreno (Anexo 3.4).

Justo debajo se precisan las dimensiones de la sonda geotérmica, seleccionando entre los diámetros de tubería existentes y marcando el valor SDR que determina el diámetro interior y que se fija en 11 por defecto. Estos parámetros junto al caudal y las propiedades del fluido que se establecerán en la siguiente viñeta, influirán en la turbulencia que se tendrá en la sonda.

Para acabar esta pantalla, en la parte inferior se marca la configuración de la sonda con forma de "U" en el intercambiador geotérmico, entre las disponibles que se muestran en la imagen adyacente. Esta elección junto a las propiedades del relleno y de la tubería, además del número de Reynolds a calcular servirán para determinar la resistencia térmica del pozo (Anexo 3.3).

Por último, para obtener los resultados del diseño de la instalación se establecen las condiciones de operación en la BCG y en el intercambiador enterrado, y los factores que ello condiciona. Los parámetros por definir son el salto térmico requerido en el intercambiador junto a las temperaturas mínimas y máximas en calefacción y refrigeración respectivamente, la turbulencia mínima que favorezca el intercambio de calor y el COP de la BCG en los meses más críticos. Este último valor se podrá tomar como unos escogidos por el usuario o utilizando el modelo contenido en el programa, que fluctúa la eficiencia en función de las temperaturas de entrada al intercambiador calculadas a partir de los límites y el salto térmico (Fig. 4.2).

Fig. 4.3-6.1 Tab: Condiciones de operación

En el panel izquierdo se tienen las condiciones predeterminadas, todas ellas editables cuando se pretende usar una BCG distinta a la del simulador. Al pulsar el botón de confirmar se completan los parámetros a la derecha. En función de la temperatura mínima en invierno se determina el fluido caloportador entre agua y una lista de anticongelantes entre los que optar, así como sus propiedades. A partir de aquí, calcula el caudal total circulante que también depende de la potencia a captar y disipar por el terreno de acuerdo con la Ec. 4.3.

Fig. 4.3-6.2 Tab: Condiciones de operación

Una vez almacenadas todas las variables de entrada y las condiciones de funcionamiento, se procede a calcular la longitud total del intercambiador y la nueva eficiencia del sistema en la ventana de resultados. La única opción que modificar es la longitud de los pozos, que determinará el número de perforaciones a realizar.

Fig. 4.3-7 Tab: Resultados del diseño

Al presionar en obtener resultados, los primeros valores a calcular serán las resistencias térmicas del terreno (Ec 4.2) y del BHE (Anexo 3.3). Una vez disponibles, se pueden emplear en las ecuaciones de longitud del modelo IGSHA (Ecs. 3.2) y que aparecen en pantalla. Las funciones que se ejecutan al pulsar este botón también calculan el balance energético (Ecs. 3.3) del terreno y aplican el factor de multiplicación sobre la longitud en el modo de climatización que origina el desbalance (el mayor entre la energía inyectada en frío o extraída en calor). Las longitudes finales en ambos modos aparecen en el panel de la longitud total del intercambiador, siendo la final el máximo entre estas dos.

A partir del valor total del intercambiador, se redondea la longitud final de metros perforados conforme a la profundidad por pozo, obteniendo así el número de pozos a realizar. Consecuentemente, se calcula el caudal circulante por cada uno y la turbulencia real que se da en el intercambiador vertical. Sobre este último valor se recalcula el valor de la resistencia térmica del BHE y, por ende, todos los valores previamente obtenidos que se actualizan automáticamente a la situación real. Estos incluyen el caudal que circularía por cada perforación y, por consiguiente, la turbulencia que se tendría debiendo ser esta superior a la establecida anteriormente. De no ser así, se modificaría el diámetro de tubería para lograrlo.

La parte inferior de la pantalla (Fig. 4.3-7) corresponde al rendimiento medio estacional que se dará en los meses de calefacción y refrigeración a lo largo de un año. En el caso de que se hubiese seleccionado un modelo de BCG distinto al del simulador, el usuario deberá introducir estos de forma manual de acuerdo con la situación que considere. Si se usa el equipo del que el programa dispone de sus prestaciones, aparecerá el botón a la izquierda de estos para su cálculo.

Como en el caso de ejemplo aplicado en las imágenes mostradas, al haber escogido tan solo la longitud máxima en refrigeración, las temperaturas reales en calefacción no se corresponderán a las previstas al establecer la mínima en el intercambiador en la pestaña anterior. También, al ser mayor la energía captada por el terreno en frío que la disipada en calor, el factor multiplicador se aplicaría en la longitud en refrigeración, por lo que las temperaturas reales tampoco coincidirán con la marcada previamente.

En cualquier situación que se dé, la variación de estas temperaturas las acerca más a la del terreno, lo que aumenta la eficiencia de la BCG. Despejando en la ecuación del cálculo de la longitud con el valor final de esta y variando el factor de uso para cada mes, se obtienen las temperaturas reales que se darían en el intercambiador en cada mes del año en calor y frío. Entrando en la gráfica parametrizada de la BCG modelo (Fig. 4.2), se asignan los valores de eficiencia a cada temperatura de entrada en el intercambiador, y se aplica el porcentaje de distribución del consumo de acuerdo con el perfil mensual energético. Al presionar en el botón de cálculo, se obtiene el valor medio final del SCOP y el SEER.

Una vez definidos los parámetros para el diseño de la instalación, se reflejan los efectos económicos y energéticos asociados a esta propuesta. De ahí que a continuación se cuantifiquen los costes aproximados que conllevaría su ejecución y los ahorros que se generarían.

Selección edificios	Demanda Térmica	Propiedades Terreno	Propiedades BHE	Condiciones Operación	Resultados	Costes	Año
Coste energético (Consumo Bomba de calor)							
Precio En. eléctrica (€/kWh)	<input type="text" value="0.14"/>	Nº años	<input type="text" value="25"/>	Coste medio anual	<input type="text" value="30313 €"/>		
Aumento anual de la tasa de interés	<input type="text" value="1.4 %"/>	Costes energético total	<input type="text" value="635702 €"/>				
Costes Perforación							
Precio por metro perforado (Long.+Sonda+Relleno)	<input type="text" value="75"/>	(€/mPerf)	Coste perforaciones	<input type="text" value="615000 €"/>			
Coste Instalación geotérmica							
Coste estimado por kW térmico de la instalación	<input type="text" value="1400"/>	(€/kW)	Coste Total	<input type="text" value="729589 €"/>			
<input type="button" value="Calcular"/>							
<input type="button" value="Prev."/>							<input type="button" value="Sig."/>

Fig. 4.3-8 Tab: Costes

Se calculan los costes totales en la factura energética (Ec. 4.5) del funcionamiento de la bomba de calor durante los años que se tomen de vida útil. Este también dependerá del precio volátil y cambiante de la electricidad que se precie en los momentos de uso y de la tasa de crecimiento del interés estimada.

Al presionar en el botón inferior de cálculo también se rellenaría las casillas correspondientes al gasto monetario en metros a perforar y del total de la instalación geotérmica, en función de los valores tabulados como ratios del coste que escoja el usuario. Estos se pretenden amortizar con los ahorros a lograr.

Ahorro Energético Anual	
Consumo energético (Actual)	445056 kWh/año
Consumo Energético (Geotermia)	216520 kWh/año
Ahorro energético (Climatización)	228535 kWh/año
Ahorro económico	31995 €/año

Ahorro Emisiones	
Factor de Emisión	0.357 kgCO2/kWh
Emisiones evitadas	81587 kgCO2/año

Fig. 4.3-9 Tab: Ahorros

A partir de la nueva eficiencia que se tendría en climatización, se prevén unos ahorros energéticos con respecto a la situación actual. Esto conllevará a una disminución en el gasto económico anual y en las emisiones de CO2 evitadas a la atmósfera por el ahorro en el uso de energía primaria. Estos se obtienen presionando en el botón inferior, y dependerán del precio y del factor de emisión del kWh eléctrico.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad para optimizar la instalación y obtener la longitud final y la eficiencia que den las prestaciones energéticas que se requieren al menor costo posible. En la parte izquierda de la pantalla se marcan las condiciones en las que se realizaría la simulación. En caso de querer variar cualquier otro parámetro distinto a estos, se debe retornar a las pestañas previas, optimizando también en base a estos según la eficiencia y la longitud del intercambiador, que son los principales condicionantes de los resultados finales.

Como se ve en la gráfica, se modifican los costes en función de la longitud instalada de intercambiador enterrado. El valor de X variará conforme lo hagan las temperaturas máxima y mínima, tomando pares de temperaturas para refrigeración y calefacción, de forma que se alejen o se acerquen ambos valores a la temperatura del terreno, en la proporción que marcan los límites inferior y superior. El paso marca cuantas veces se realiza una nueva simulación completa de todos los valores obtenidos anteriormente, para graficar las curvas. Como aclaración, en el ejemplo de la imagen, se calcularía la longitud como valor ascendente y sus costes asociados, desde [36.5-4.5]°C como temperaturas máxima en refrigeración y mínima en calefacción respectivamente, cada 0.5°C hasta [28.5-11.5]°C.

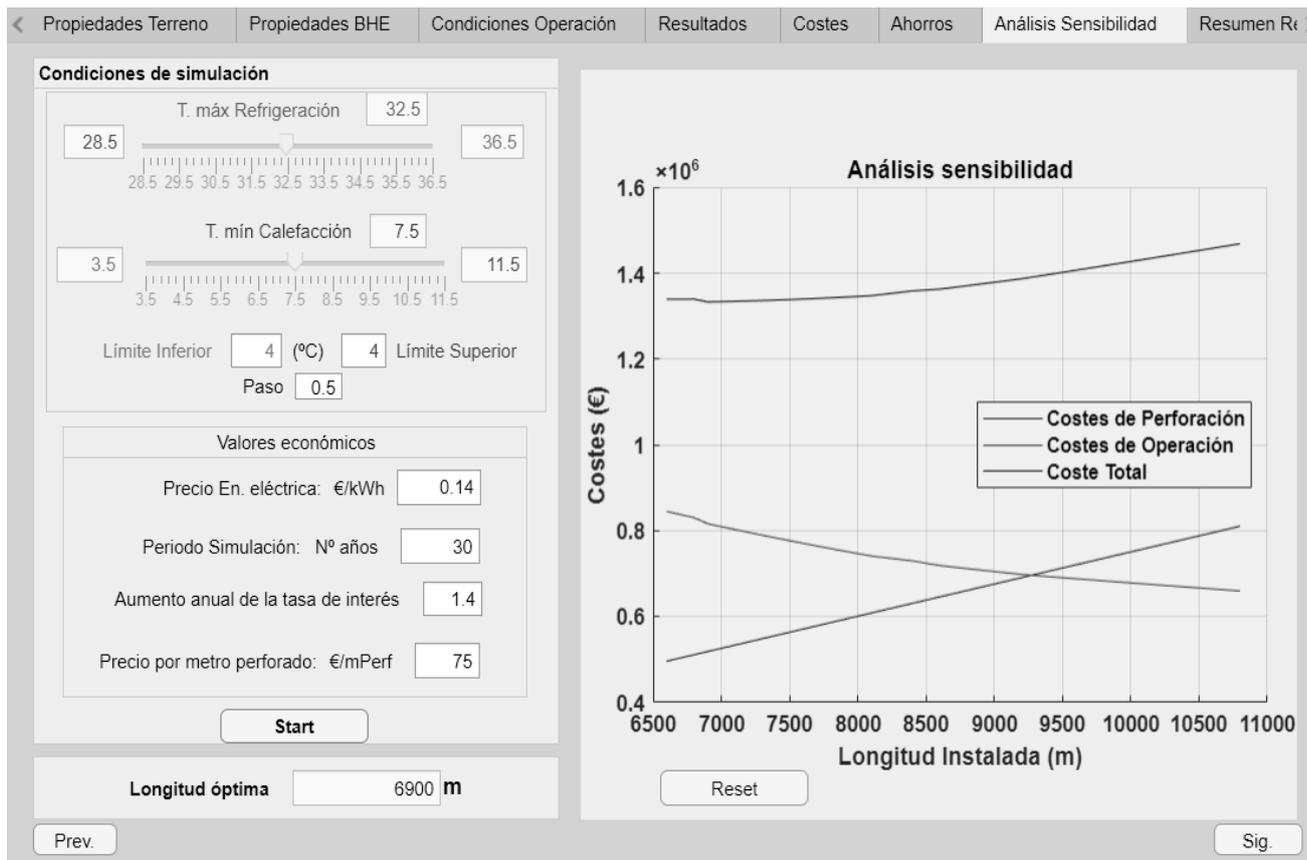


Fig. 4.3-10 Tab: Análisis de sensibilidad

Los parámetros económicos se pueden considerar similares a los usados previamente o realizar una nueva simulación con unos nuevos. La gráfica se completa presionando en start y si se desea variar alguna variable, esta se reiniciaría con el botón de reset.

Como se muestra en el ejemplo, los costes de perforación y energéticos aumentan y decrecen respectivamente, conforme a una mayor longitud instalada (menor eficiencia de la instalación). La suma de estos sería el coste total a lo largo de los años de vida útil simulados, al cual le corresponde un mínimo asociado a la longitud óptima que aparece en la esquina inferior de la pantalla.

En la última ventana del programa se comparan el modelo optimizado y sus características, con el que se diseña con los parámetros introducidos durante el programa. Cabe destacar que ambos diseños se han realizado con los mismos valores de entrada, a excepción de las temperaturas mínimas y máximas en el intercambiador, que varían los resultados de la instalación que se muestra en el resumen de estos.

Resultados Previos		Optimizado	
Longitud Instalada	8200 m	Longitud Instalada	6900 m
Nº Perforaciones	82	Nº Perforaciones	69
T. mín Real en Calefacción	10.1 °C	T. mín Real en Calefacción	8.8 °C
T. máx Real en Refrigeración	30.1 °C	T. máx Real en Refrigeración	32.4 °C
SCOP	4.57	SCOP	4.42
SEER	4.49	SEER	4.20
Costes Energético (Vida útil)	738413 €	Costes Energético (Vida útil)	776862 €
Costes Perforación	615000 €	Costes Perforación	517500 €
Optimización Económica		59051 €	

Fig. 4.3-11 Tab: Resumen de los Resultados

Se compara la longitud perforada y sus consecuentes costes, y la eficiencia de la BCG resultante de las temperaturas reales que se darán en el intercambiador con sus costes de explotación. Como diferencia entre gastos, se obtiene la optimización en cuanto al ahorro que se tendría tomando la alternativa optimizada.

La curva de costes y la comparación de resultados del ejemplo realizado (Fig 4.3-10) concluyen que a la izquierda del punto que se diseñó se permite cubrir la carga pico del edificio sin sobrepasar los límites de temperaturas en el intercambiador. Esta variación disminuye sensiblemente la eficiencia de la instalación aumentando así el gasto energético, pero en proporción, la rebaja de la inversión en perforaciones es mayor y, por tanto, se optimiza económicamente con respecto a la situación inicial.

5. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras describir la metodología y el modelo matemático seguidos, y su programación en el simulador, una representación de la interfaz de usuario, es necesario realizar una validación de los resultados obtenidos en la aplicación para corroborar su veracidad como método para el cálculo de instalaciones de intercambiador vertical de bucle cerrado.

El objetivo es comprobar si la longitud calculada mediante el simulador del intercambiador posibilita cubrir totalmente la demanda térmica requerida y permite un funcionamiento sostenible. Durante la elaboración del modelo ya se calibraron varios parámetros a partir de ejemplos que había disponibles en el libro del que se extrajo la metodología de este proyecto [5].

No obstante, para validar los resultados con un programa comercial, se utiliza el “Earth Energy Designer” (EED) como herramienta altamente aceptada en la simulación de instalaciones de BCG con intercambiador vertical [24].

Para ello, se han realizado ejemplos de simulación con algunos de los edificios de la UPV de los que se dispone. Estos se ejecutaron en las siguientes condiciones:

Información geológica	
Conductividad térmica (W/mk)	2,3
Temperatura del terreno (°C)	18
Información del intercambiador enterrado	
Tipo de tubería: disposición, material, diámetro, SR	Simple U, PEHD, DN32, PN16, SR11
Díametro de la perforación (mm)	125
Separación entre perforaciones (m)	6
Conductividad del relleno (W/mK)	2,1
Temperatura MIN media de diseño en el intercambiador	7,5
Temperatura MAX media de diseño en el intercambiador	32,5

Fig. 5.1 Valores por defecto para simulación

En el programa comercial, aparte de estos parámetros, se debe introducir la potencia pico y el COP a los que trabaja la BCG en los puntos de diseño, el volumen de caudal circulante y una distribución mensual de la carga base y de las horas de funcionamiento, todo ello en función del edificio escogido. Por último, para comprobar la efectividad, se introduce para realizar la simulación la longitud total obtenida en la aplicación creada, para observar el comportamiento que expone en el EED.

Tras ejecutarlo con estos parámetros, se analizó la evolución anual de las temperaturas en el intercambiador enterrado para visualizar el margen de error existente. Por lo general, al ser mayor en Valencia la potencia inyectada al terreno en refrigeración que la extraída en calefacción, la variable crítica será la temperatura máxima en el intercambiador debido a este desbalance.

De primeras se comprueba que un factor determinante en el diseño como es el valor de la resistencia térmica del BHE que se obtiene en el EED por su propia base de datos o la turbulencia en el intercambiador son prácticamente iguales a las que calcula la aplicación desarrollada (Anexo 3.3). Sobre el ejemplo realizado en el apartado anterior en la ETSII se obtenía una resistencia térmica de 0,08 mK/W (Fig. 4.3-7). Este es similar para unas mismas medidas y condiciones de diseño del intercambiador si se compara el valor obtenido con el EED.

THERMAL RESISTANCES

Borehole therm. res. internal	0,38 (m·K)/W
Reynolds number	9732
Thermal resistance fluid/pipe	0,00726 (m·K)/W
Thermal resistance pipe material	0,07868 (m·K)/W
Contact resistance pipe/filling	0 (m·K)/W
Borehole therm. res. fluid/ground	0,07605 (m·K)/W
Effective borehole thermal res.	0,08347 (m·K)/W

Fig. 5.2 Resistencia térmica BHE EED (ETSII)

A continuación, se comparan las gráficas de la evolución temporal de la temperatura en el intercambiador de acuerdo con el EED con la máxima que se obtendría en el intercambiador según nuestro modelo. Como se ha comentado, en la ciudad de Valencia dada la exigencia con el terreno en refrigeración para una instalación de BCG, se entienda la temperatura máxima en el intercambiador en refrigeración como la que marca un correcto funcionamiento para cubrir la demanda pico.

Se han realizado tres ejemplos sobre los siguientes conjuntos de edificios:

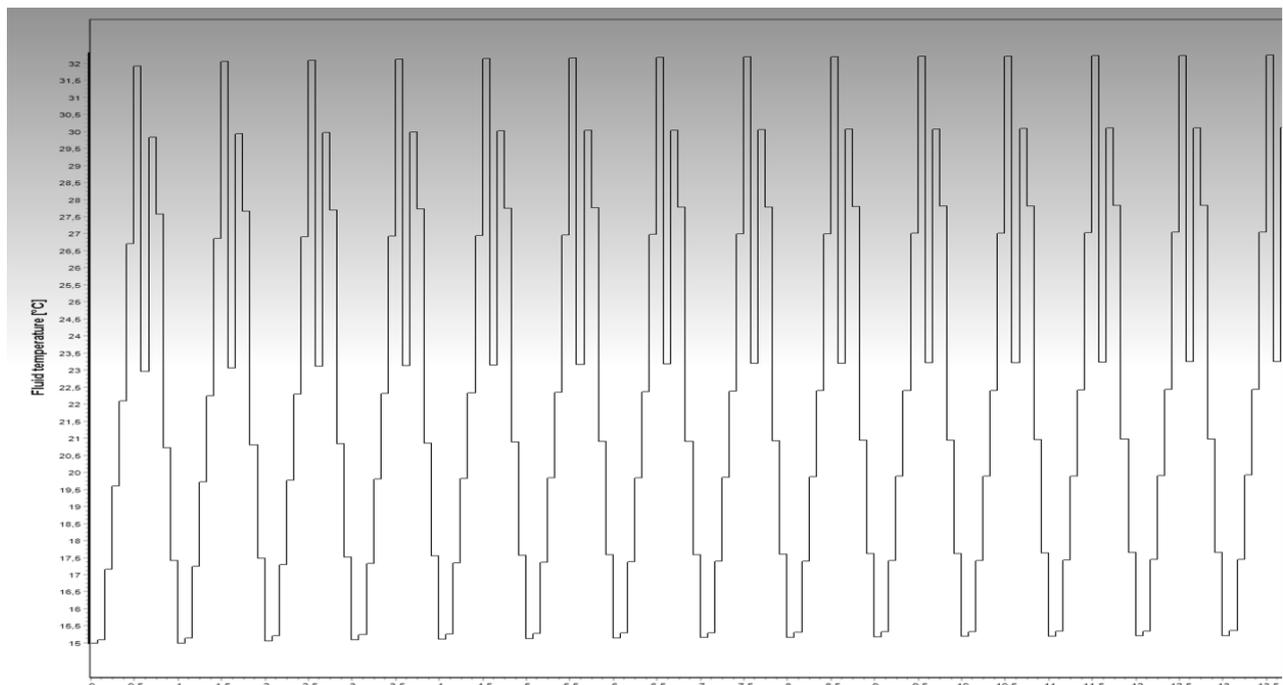


Fig. 5.3-1 Evolución temperaturas ETSA (EED)

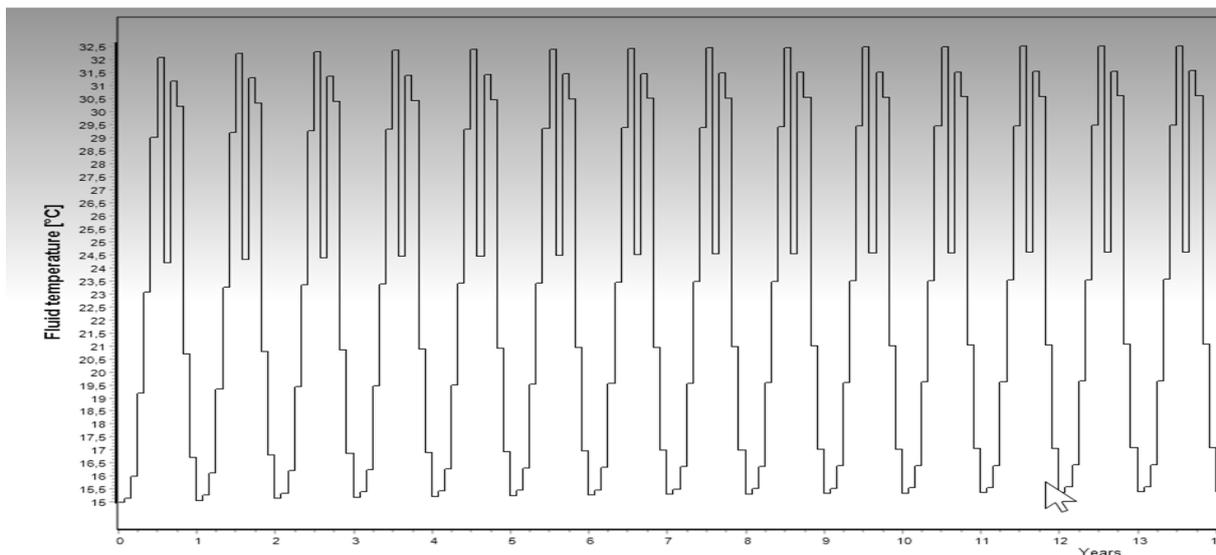


Fig. 5.3-2 Evolución temperaturas ETIINF (EED)

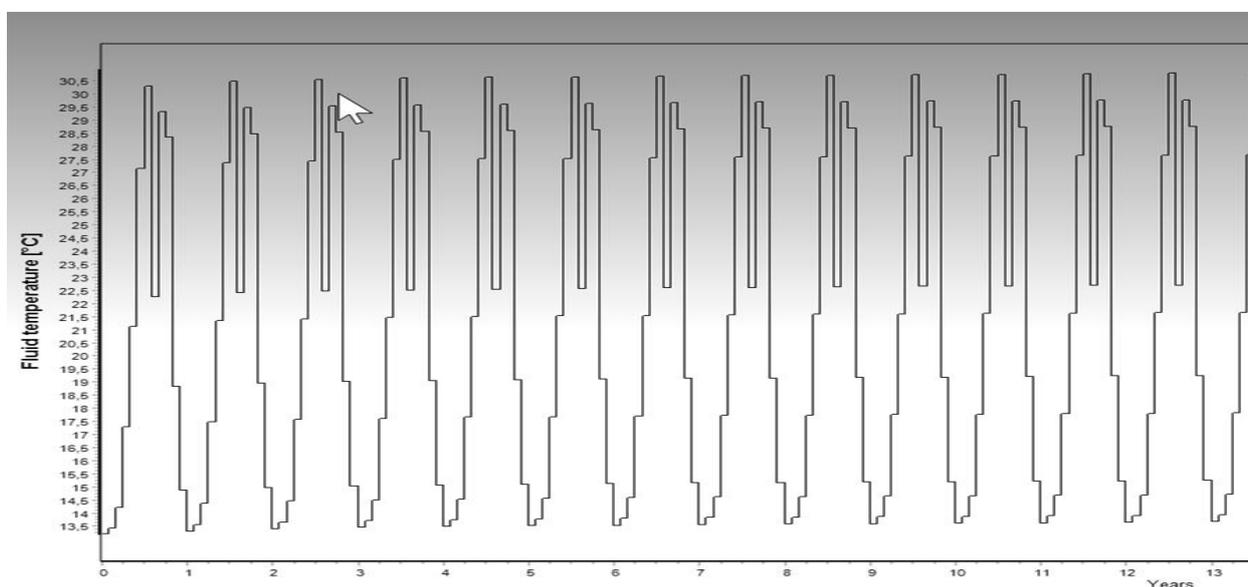


Fig. 5.3-1 Evolución temperaturas ETSIAMN (EED)

EDIFICIO	T ^a Simulador (°C)	T ^a EED (°C)	Diferencia (°C)	Error Relativo
ETSA	31,3	32	0,7	2%
ETSIINF	31,6	32,6	1,0	3%
ETSIAMN	30,6	30,9	0,3	1%

Cuando se diseña con el EED, se marca la longitud a instalar para tratar de lograr la mínima variación posible en las temperaturas simuladas durante el periodo analizado, con tal de no reducir la eficiencia de la instalación. Como al comparar las temperaturas obtenidas en cada modelo se aprecia una diferencia no superior a la unidad, se puede concluir que el error es mínimo y los resultados de la aplicación están dentro del criterio de diseño que emplea EDD.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para visualizar los resultados obtenidos al usar la aplicación, se va a realizar la simulación sobre algunos de los bloques de edificios de la UPV. El consumo eléctrico de estos alcanza casi 40 millones de kWh al año, con el gasto económico que ello conlleva. El porcentaje de climatización se estima casi en la mitad del total, por lo que el planteamiento de medidas de ahorro es primordial [3].

En este punto se van a analizar los valores calculados en las condiciones nominales de ejecución establecidas en el apartado anterior, pero con los resultados que se obtienen al aplicar la optimización en los costes, de la aplicación programada.

En la tablas 6.1 y 6.2, se recogen los principales puntos de las instalaciones a diseñar. Esta la conforman el consumo energético total en calefacción y refrigeración, junto a la longitud instalada de intercambiador y la nueva eficiencia. También comprende los costes y ahorros del sistema, sobre los que sacar las conclusiones.

Se realiza para los siguientes bloques de edificios del campus una estimación de la implementación de instalaciones de bomba de calor geotérmica de bucle cerrado mediante la herramienta diseñada, conforme a los consumos que se precisaron y a los costes de instalación tomados, obteniendo los siguientes resultados.

Bloque edificios	Demanda Térmica (kWh/año)		Consumo elect. Climatización (kWh/año)	Long. Instalada (m)	Rendimiento estacional	
	Calefacción	Refrigeración			SCOP	SEER
ETSIEDIF	407.363,2	322.674,2	324.282,4	46.000	4,19	4,36
ETSIINF	511.952,4	516.187,5	462.874,7	6.800	4,32	4,25
ETSA	756.675,8	666.924,4	636.132,5	10.800	4,31	4,29
ETSIAMN	819.489,0	826.268,1	740.929,7	10.900	4,32	4,25
ETSII	445.539,2	533.679,8	445.055,6	6.900	4,42	4,20
ASIC + BIBLIOTECA	1.150.457,5	1.337.357,0	1.128.861,5	16.800	4,49	4,36
CPI	4.568.175,3	4.605.965,1	4.130.252,6	63.600	4,37	4,34

Tabla. 6.1 Resultados tras simulación

Se observa que es necesario un gran consumo en climatización para cubrir la demanda en calefacción y refrigeración y, por tanto, una gran longitud de intercambiador enterrado para intercambiar tal cantidad de energía con el terreno. Como ya se ha comentado, el nuevo foco de intercambio y sus temperaturas más favorables da como consecuencia una eficiencia que como se muestra en la continuación de la tabla, reducirían el consumo eléctrico prácticamente al 50%.

Bloque edificios	Consumo elect. Climatización (kWh/año)	Long. Instalada (m)	Consumo Geotérmico (kWh/año)	Coste perforación (€)	Ahorro económico (€/año)	Ahorro emisiones (kgCO2/año)
ETSIEDIF	324.282,4	46.000	171.230,6	345.000	21.427	54.640
ETSIINF	462.874,7	6.800	239.963,4	510.000	31.208	79.579
ETSA	636.132,5	10.800	331.023,1	810.000	42.715	108.924
ETSIAMN	740.929,7	10.900	384.112,6	817.500	49.954	127.384
ETSII	445.055,6	6.900	227.867,4	517.500	30.406	77.536
ASIC + BIBLIOTECA	1.128.861,5	16.800	562.959,9	1.260.000	79.226	202.027
CPI	4.130.252,6	63.600	2.106.631,3	4.770.000	283.307	722.433

Tabla. 6.2 Resultados tras simulación

Vemos como efectivamente esta tecnología nos posibilita conseguir grandes ahorros en emisiones de CO₂ y en gasto económico al año, sin embargo, el desembolso correspondiente a la instalación y principalmente de las perforaciones a realizar dificultan conseguir una buena amortización, por lo que sería de interés su reducción.

Para la solución planteada (bucle vertical cerrado) se proponen las siguientes mejoras a margen de los resultados obtenidos de la aplicación, para tratar reducir los costes de perforación y/o aumentar la eficiencia energética en la instalación, ya sea modificando el intercambiador enterrado por unos de mayor rendimiento o mediante una hibridación del sistema geotérmico.

Hibridación con otros sistemas:

-Apoyo mediante paneles fotovoltaicos. Tratando de reducir lo máximo posible el consumo energético, se propone combinar el sistema geotérmico con una instalación de paneles fotovoltaicos, y aprovechar el autoconsumo para ser lo más rentable económica y medioambientalmente posible.

-Hibridación con aerotermia. Si se diseña la instalación geotérmica para potencias pico menores, los costes de perforación se reducirían al no requerir tanta longitud de sonda y se aumentaría la eficiencia de este sistema. Los picos de carga en las épocas críticas se cubrirían con una instalación de aerotermia, que no alcanzaría tanta eficiencia, pero su coste de equipamiento sería menor.

Otras tipologías de intercambiadores de calor o sonda geotérmica:

-Tubería experimental de plástico de alta densidad. Sustituyendo las clásicas sondas de polietileno de alta densidad, por opciones en desarrollo como tuberías de plástico de una gran conductividad, se conseguiría una reducción en la longitud de intercambiador necesaria, al disminuir la resistencia térmica del pozo geotérmico (Ec. 3.2).

- **Sistema DCL (Dynamic closed loop).** Esta tecnología reciente que junta las ventajas del bucle cerrado y abierto emplea una sonda compuesta por un haz de varios tubos de diámetro pequeño por los que circulan el agua impulsada por un grupo de bombeo en el fondo del intercambiador, permitiendo el traspaso de calor por conducción y convección. Este sistema tiene la eficiencia de un modelo de lazo abierto y reduce considerablemente el número de perforaciones a realizar, por lo que se reducirían los costes en general por su menor inversión [25].

- **Otras configuraciones de intercambiador de calor:** coaxial, trilobular, etc.

-**Aguas subterráneas o residuales.** En caso de que se tenga la posibilidad de realizar el intercambio de calor con una masa de agua del subsuelo o procedentes de riego u otros procesos como de intercambio, la eficiencia que se obtendría como bucle abierto sería mayor que la de los modelos de bucle cerrado.

Aplicaciones indirectas:

-**Subvenciones.** Tener en cuenta la gestión de posibles ayudas a la energía geotérmica somera, para disminuir el coste de la instalación y lograr una mejor amortización. [26]

7. CONCLUSIONES

Este capítulo está dedicado a la evaluación de los resultados obtenidos, junto a un análisis de la metodología empleada y propuestas de mejora de la aplicación realizada.

Como se ha observado, las cargas térmicas de los edificios de la UPV requieren destinar un gran consumo energético y desembolso económico anual. Una vez se han diseñado las hipotéticas instalaciones geotérmicas de bucle vertical cerrado, se ha observado que el cuantioso aumento de la eficiencia debido al uso del terreno como foco de intercambio, proporciona ahorros de casi la mitad del gasto eléctrico destinado a climatización. Otra ventaja de la geotermia somera es no depender de las condiciones ambientales y el escaso mantenimiento necesario, sin embargo, los costes de infraestructura obtenidos son elevados debido a la elevada demanda energética de los edificios.

Se ha comprobado en la validación del simulador que la metodología IGSHPA [5] como base general del diseño completo junto a todos los subprocesos descritos para obtener cada variable [14] [22], reproducen resultados aceptables en la gestión de instalaciones geotérmicas de bucle vertical cerrado. No obstante, hay que tener en cuenta que en el modelo IGSHPA se aplican las peores condiciones de funcionamiento durante el año. Al no trabajar siempre a carga pico, el compresor no funciona la mayoría del tiempo al 100% de velocidad, por lo que la eficiencia media real sería aún mayor, permitiendo este ahorro económico una mejor amortización.

Como tendencia que sigue la curva del análisis de sensibilidad que se asemeja en todos los bloques de la UPV (Fig. 4.3-10) debido a su gran tamaño y el desbalance en el terreno por refrigeración, se llega a la conclusión de tratar de disminuir los costes de perforación por su elevado valor en sacrificio de una ligera disminución en la eficiencia. También se pueden alcanzar mejores resultados aumentando el rendimiento de la instalación, como se ha comentado en las posibles mejoras del sistema.

La demostración mediante los resultados obtenidos hace constancia de la consecución de los objetivos que se plantearon al inicio del proyecto. Así mismo, confirman esta alternativa energética como una opción limpia, sostenible y eficiente, muestran el compromiso de este proyecto con la consecución de los ODS [4] (Anexo 2).

Líneas de ampliación en la aplicación

A continuación, se proponen posibles mejoras y ampliaciones que agregar al simulador diseñado, con el objetivo de facilitar su interfaz, añadir valor a la herramienta realizada y mejorar sus características. La aplicación actual cumple con los objetivos propuestos a la evaluación de sistemas de climatización por BCG, por lo que las ideas citadas pretenden agregar opciones en la introducción de datos y de elementos de diseño, que completen al máximo la aplicación.

- Generar un archivo PDF o .txt a modo de reporte con un resumen de las propiedades del diseño y los resultados obtenidos.
- Añadir los bloques de edificios del campus de Vera de la UPV restantes, de los que no se pudo disponer de sus consumos.
- Ampliar la selección de edificios. Cuando se pretende marcar un edificio distinto de la UPV, que aparezca un plano del territorio nacional con las ciudades de este a marcar. En función de lo escogido, se almacenarán los valores de acuerdo con el DBHE, de la zona climática en función de la altitud, la temperatura del agua fría en la red, etc. [27]
- En el caso de seleccionar la opción anterior, poder definir las características del edificio como el tipo de uso (residencial, oficina...), la superficie o su ocupación.
- Cálculo automático del consumo anual en ACS de acuerdo con el DBHE4, dependiendo de las propiedades del edificio y su localización.
- Más complicado, sería crear una función que calcule las cargas térmicas del recinto en base a algún modelo existente, por lo que se podría de momento emplear un programa destinado a ello específicamente.
- Al igual que se hizo con la distribución mensual del consumo energético, aplicarlo con las horas de uso diario para obtener un factor de uso mejor definido.
- Al modificar la conductividad térmica del terreno, acceder a un mapa geológico del terreno con una aproximación de estos valores. Así mismo, mostrar el reto de propiedades del terreno como son la difusividad y la capacidad térmicas.
- Dedicar una pestaña exclusiva tanto como al balance de intercambio de energía con el terreno, y al cálculo del SPF en calefacción, refrigeración y ACS en función de las temperaturas reales en el intercambiador, graficado en función el mes.
- Agregar el cálculo de pérdidas en el circuito y del consumo de la bomba de circulación al coste total, para definir el circuito hidráulico.
- Realizar un análisis sensibilidad más completo. En el que se emplea en la aplicación, las variaciones de las temperaturas en el intercambiador se almacenan como vectores y los resultados se grafican como curvas en 2D. Se propone almacenar todas las opciones posibles a recalcular como una matriz para mostrar la gráfica en 3D y obtener una mejor interpretación del valor optimizado.

Conclusión personal

Desde un primer momento, la idea de este proyecto se planteó como una oportunidad en el ámbito de la eficiencia energética, con el propósito de formar parte de una transición energética hacia una sociedad más sostenible. Su realización conjunta con la aplicación programada hicieron de este trabajo una propuesta muy interesante y única.

Se han demostrado las mejoras que se pueden obtener del uso de la geotermia somera, la cual, con un correcto desarrollo y formación, junto a las condiciones de diseño más adecuadas y convenientes en cada situación, la convierten en una alternativa renovable bastante factible en el ámbito de la climatización.

También, reafirmar la relación de este proyecto con las asignaturas del grado mencionadas al principio, especialmente con las conectadas con la termodinámica y la transmisión de calor, y principalmente con la optativa de geotermia que dio paso a la realización de este proyecto. Se han consolidado los conocimientos adquiridos en su momento y la reafirmado la predilección por estas en aras de mi futuro desarrollo como ingeniero.

Por último, destacar la cuantiosa y beneficiosa mejora adquirida en el uso del programa de cálculo Matlab y sus complementos, durante la elaboración de la aplicación y su código en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030* (2020)
< https://www.miteco.gob.es/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf>
- [2] Asociación de empresas de energías renovables (APPA) *Energías renovables, sector térmico*.
<<https://www.appa.es/energias-renovables/>> (Consulta: enero 2023)
- [3] Vicerrectorado de Desarrollo Sostenible de los Campus. (2022). Consumos y gastos energéticos en la UPV.
<https://www.upv.es/entidades/vcampus/wp-content/uploads/2022/10/CG-2022.09.29_Consumos-y-costes-energeticos-en-la-UPV.pdf>
- [4] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2012). “*Guía técnica Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*” en *Ahorro y Eficiencia energética en Climatización 14*. Disponible en: <<https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-diseno-de-sistemas-de-intercambio-geotermico-de-circuito-cerrado>>
- [5] INTERNATIONAL GROUND SOURCE HEAT PUMP ASSOCIATION, et al. *Residential and light commercial design and installation manual*. IGSHA, Oklahoma State University, Stillwater, OK, 2009.
- [6] Naciones unidas. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)
<<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>>
- [7] IDEA con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (2010). *Manual de Geotermia*. Disponible en: < <https://www.idae.es/publicaciones/manual-de-geotermia-reimpresion>>
- [8] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2014). *UNE 100715-1 Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical*.
- [9] IDAE (2011). *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. Disponible en: < <https://www.idae.es/publicaciones/evaluacion-del-potencial-de-energia-geotermica>>
- [10] ZENG, Heyi Y.; DIAO, Nairen R.; FANG, Zhaohong H. *A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers*. Heat Transfer. Asian Research. (2002), vol. 31.
- [11] INGERSOLL, Leonard R.; ZOBEL, Otto J.; INGERSOLL, Alfred Cajori. *Heat conduction with engineering, geological, and other applications*. Univ. of Wisconsin Press, Madison, USA, 1954.
- [12] CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, USA. 1986.
- [13] KUSUDA, Tamami; ACHENBACH, Paul R. *Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States*. Gaithersburg, MD, USA: National Bureau of Standards, 1965.

- [14] KAVANAUGH, Stephen P.; RAFFERTY, Kevin. *Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, Chap.3. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc. (ASHRAE), Atlanta, GA, 1997.
- [15] Temperatura media ambiental Valencia ciudad. (Consulta: 2022)
<<https://es.weatherspark.com/y/42614/Clima-promedio-en-Valencia-España>>
- [16] IGME. Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie).
<<http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>>
- [17] Prueba continúa de penetración superpesada DPSH realizada en la UPV. Empresa: SONDE, ESTRUCTURAS y Geotecnia S.A.
- [18] ASHRAE. Supplemental Files for Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems. Disponible en: <<https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/supplemental-files/supplemental-files-for-geothermal-heating-and-cooling-design-of-ground-source-heat-pump-systems>> (Consulta: 2023)
- [19] Fichas técnicas Ecoforest bombas de calor gama ecoGEO+. <https://ecoforest.com/wp-content/uploads/2021/08/DS_Ecoforest_heat_pumps_ES_v2022_01.pdf?x23408>
- [20] IDEA. *Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios* (2014).
- [21] CHEAP, Cheap-Gshps. *Efficient Application of Reliable Ground Source Heat Exchangers and Pumps* (2018).
- [22] IDAE. *Factores de emisión de co2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España* (Versión 2014).
- [23] Matlab licencia para estudiantes.
Disponible en: <<https://www.mathworks.com/>>
- [24] Programa EED - EARTH ENERGY DESIGNER.
Disponible en: <https://buildingphysics.com/eed-2/>
- [25] Sistema DCL (Dynamic closed loop). (Consulta: mayo 2023)
<<http://www.dclgeoenergia.com/es/geotermia-con-sistema-dclZ>>
- [26] Institut Valencià de Competitivitat Empresarial. *Ayudas instalaciones renovables térmicas en diferentes sectores de la economía* (2022). (Consulta: junio 2023)
<<https://www.ivace.es/index.php/es/ayudas/energia/ayudas-ahorro-y-eficiencia-energetica-energias-renovables-y-autoconsumo-solicitud-abierta/55756-ayudas-instalaciones-renovables-termicas-en-diferentes-sectores-de-la-economia-2022>>
- [27] Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). (2022) <<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>>

ANEXO 1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este apartado se desglosan los costes correspondientes al personal humano y a los recursos empleados y requeridos para el desarrollo de este proyecto y de la aplicación creada. Esta lista comprende el trabajo de ingeniería realizado como la mayor totalidad del presupuesto, y el ordenador como equipo junto a la licencia del programa empleado.

Gastos	Costes fijos (€)	Coste horario (€/h)	Horas empleadas (h)	Unidades (-)	Coste Total (€)
Trabajo de ingeniería en el proceso de desarrollo	(-)	15	300	1	4500
Ordenador portátil: Asus	500	(-)	(-)	(-)	500
Licencia académica Matlab	260	(-)	(-)	(-)	260
Coste total	(-)	(-)	(-)	(-)	5260

ANEXO 1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

ANEXO 2. RELACIÓN CON LOS ODS

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	NoProcede
ODS 1. Fin de la pobreza.			X	
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.			X	
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables.		X		
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

ANEXO 2. RELACIÓN CON LOS ODS

Este proyecto está principalmente alineado con ODS7 "Energía asequible y no contaminante" ya que su finalidad es investigación en energía geotérmica, avanzando en una energía renovable más eficiente y rentable. Además, contribuye significativamente en consecución ODS11 (comunidades energéticas más sostenibles), ODS13 (lucha contra el cambio climático) reduciendo emisiones de CO₂ y ODS9 (fomento innovación) [28]. También guarda relación con ODS12 (producción y consumos responsables) y todos los relacionados con una mejoría en el bienestar económico.

ANEXO 3. VALORES TABULADOS

Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sept.	oct.	nov.	dic.
Máxima	16 °C	16 °C	18 °C	20 °C	23 °C	27 °C	29 °C	30 °C	27 °C	24 °C	19 °C	16 °C
Temp.	11 °C	12 °C	14 °C	16 °C	19 °C	23 °C	26 °C	26 °C	23 °C	19 °C	15 °C	12 °C
Mínima	6 °C	7 °C	9 °C	11 °C	14 °C	18 °C	21 °C	22 °C	19 °C	15 °C	11 °C	7 °C

1. Temperatura ambiental en Valencia [15]

Fluid	Temperatura	Calor específico (Cp)	Densidad	Visc. Dinámica
	°C	J/kgK	kg/m ³	kg/ms
Water	0	4217	999,8	0,001791
Water	5	4202	1000	0,00152
Water	10	4192	999,8	0,001308
Water	15	4186	999,2	0,001139
Water	20	4182	998,3	0,001003
Water	25	4180	997,2	0,000891
Water	30	4178	995,8	0,000798
Water	35	4178	994,1	0,00072
Water	40	4179	992,3	0,000653
10% Propylene glycol	5	4107	1011	0,002261
10% Propylene glycol	0	4103	1012	0,002687
10% Propylene glycol	-5	4099	1012	0,003199
20% Propylene glycol	0	4020	1021	0,004053
20% Propylene glycol	-5	4012	1023	0,004871
20% Propylene glycol	-10	4004	1024	0,00584
30% Propylene glycol	-5	3904	1033	0,008803
30% Propylene glycol	-10	3894	1034	0,01085
30% Propylene glycol	-15	3883	1036	0,013276
10% Ethylene glycol	5	4075	1017	0,001805
10% Ethylene glycol	0	4071	1018	0,002088
10% Ethylene glycol	-5	4067	1019	0,002421
20% Ethylene glycol	0	3918	1036	0,003022
20% Ethylene glycol	-5	3910	1037	0,003561
20% Ethylene glycol	-10	3902	1039	0,004197
30% Ethylene glycol	-5	3753	1055	0,004937
30% Ethylene glycol	-10	3742	1057	0,005852
30% Ethylene glycol	-15	3731	1058	0,006918

2. Propiedades del fluido caloportador (elaboración propia a partir de bases de datos [18])

Tube Diameter and Dimension	Tube Location	Bore Diameter, mm	Thermal Resistance of Bore, m ^o C/W								
			Fluid Reynolds No. = 2000			Fluid Reynolds No. = 4000			Fluid Reynolds No. = 10,000		
			Grout Conductivity, W/m ^o C			Grout Conductivity, W/m ^o C			Grout Conductivity, W/m ^o C		
			0.70	1.40	2.10	0.70	1.40	2.10	0.70	1.40	2.10
25 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	100	0.26	0.17	0.14	0.24	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
		125	0.29	0.18	0.15	0.26	0.16	0.12	0.26	0.11	0.12
	C	100	0.18	0.13	0.11	0.16	0.10	0.09	0.15	0.10	0.08
		125	0.19	0.13	0.11	0.17	0.11	0.09	0.16	0.10	0.08
Double	125	0.16	0.10	0.08	0.14	0.08	0.06	0.14	0.08	0.06	
32 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	100	0.24	0.16	0.13	0.21	0.13	0.10	0.21	0.13	0.10
		125	0.26	0.17	0.14	0.23	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
		150	0.28	0.18	0.14	0.26	0.15	0.12	0.25	0.15	0.11
	C	100	0.17	0.12	0.11	0.15	0.10	0.08	0.14	0.09	0.08
		125	0.18	0.13	0.11	0.16	0.10	0.08	0.15	0.10	0.08
		150	0.19	0.13	0.11	0.17	0.11	0.09	0.16	0.10	0.08
Double	125	0.15	0.09	0.07	0.13	0.08	0.06	0.13	0.08	0.06	
Double	150	0.15	0.10	0.08	0.14	0.08	0.06	0.14	0.08	0.06	
40 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	125	0.24	0.16	0.13	0.22	0.13	0.11	0.21	0.13	0.10
		150	0.26	0.17	0.14	0.23	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
	C	125	0.17	0.12	0.11	0.15	0.10	0.09	0.14	0.09	0.08
		150	0.18	0.13	0.11	0.16	0.11	0.09	0.15	0.10	0.08
Double	150	0.14	0.09	0.07	0.13	0.08	0.06	0.13	0.08	0.06	

3. Resistencia térmica del BHE [14]

Sodium Bentonite Recipes							
Bentonite, kg	Silica Sand, kg	Graphite, kg	Water, L	Note	Yield, L	TC (k_{grt}), W/m-K	Density, kg/m ³
23	0	0	125		36	0.68	1077
23	0	0	91		27	0.73	1113
23	0	0	53		17	0.76	1173
23	45	0	57		23	1.2	1436
23	91	0	68		32	1.6	1496
23	181	0	83		42	2.2	1807
23	0	4	61	HPG*	18	1.6	1269
23	23	4	68	HPG*	23	1.6	1340
23	0	7	61	SPG*	19	1.6	1245
23	23	5	91	SPG*	31	1.6	1197
23	0	7	68	HPG*	21	2.2	1221
23	23	7	76	HPG*	25	2.2	1352
23	0	9	57	SPG*	18	2.2	1293
23	45	7	61	SPG*	23	2.2	1556
Cement Recipes							
Cement, kg	Silica Sand, kg	Other, kg	Water, L	S. Plasticizer, oz	Yield, L	TC (k_{grt}), W/m-K	Density, kg/m ³
43	91	0					
43	91	135-180					
43	91	0	23	21	72	2.2	2178
Engineered, High-Yield Cement for GSHP Applications							
Cement, kg	Silica Sand, kg	Graphite, kg	Water, L	Note	Yield, L	TC (k_{grt}), W/m-K	Density, kg/m ³
23	0	0	42		49	0.8	1305
23	0	4	42	HPG*	49	1.6	1376
23	0	7	42	HPG*	53	2.3	1340

4. Conductividad térmica del relleno [14]

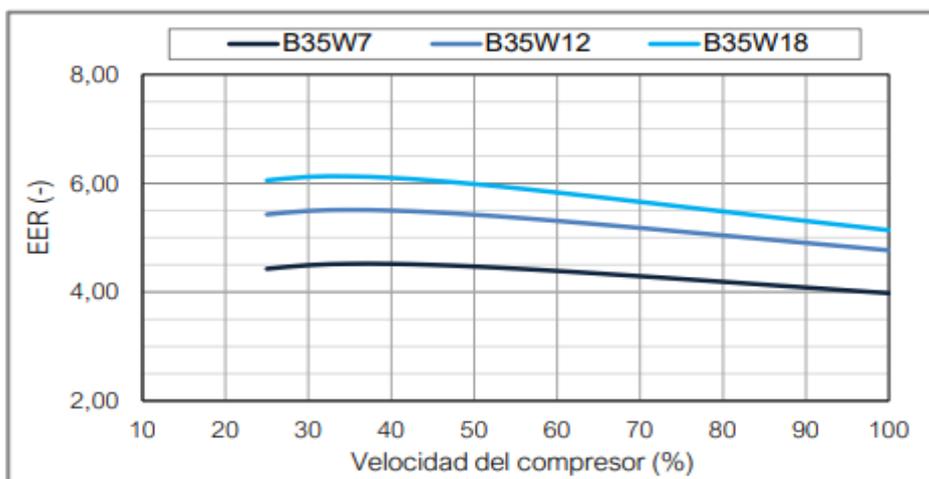


Fig. 1 EER T^a impulsión 7/12/18°C

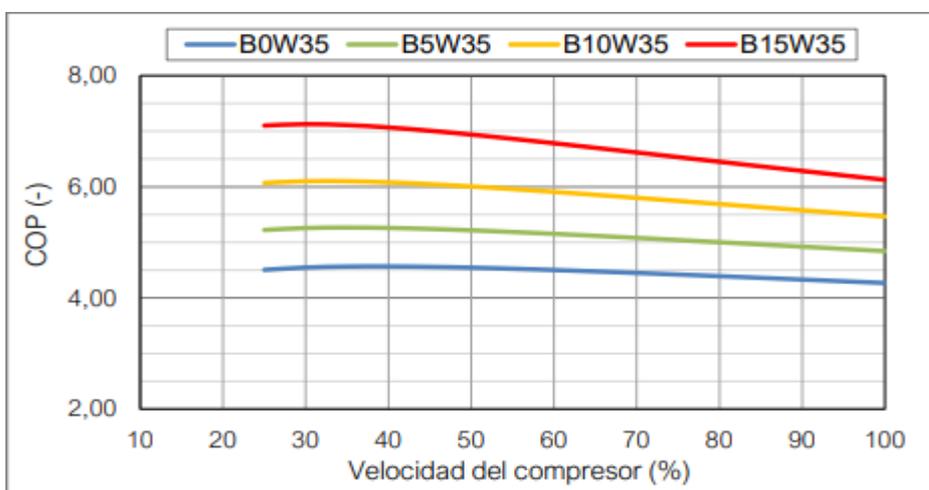


Fig. 2 COP T^a impulsión 35°C

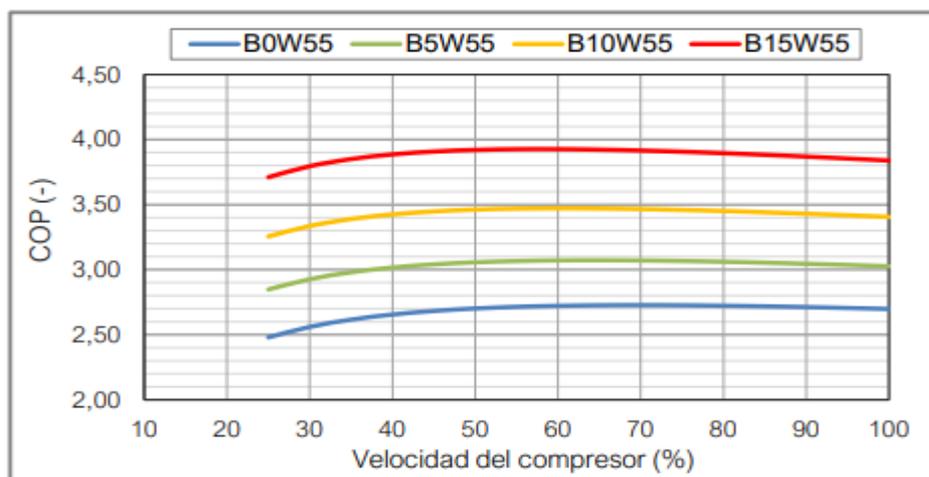


Fig. 3 COP T^a impulsión 55°C

5. COP del modelo ecoGEO+ HP 25-100 en función de la velocidad del compresor [19].

ANEXO 4. MANUAL DE USUARIO

HERRAMIENTA ESTIMATIVA PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICA DE BUCLE CERRADO Y EVALUACIÓN DE LOS COSTES Y RENDIMIENTOS. APLICACIÓN EN LOS PRINCIPALES EDIFICIOS DEL CAMPUS DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV).

Entorno Gráfico: Complemento AppDesigner de Matlab.

Interfaz de usuario: “GroupTabs” que organicen los distintos componentes visuales e interactivos en un orden lógico y estructurado.

-Requisitos mínimos de hardware y software (Recomendación):

- Licencia en uso de MATLAB® (Versión lo más reciente posible)
- Sistema operativo:
 - Windows: 11, 10 (versión 20H2 o mayor), Server 2019 o Server 2022
 - MacOS: Ventura (13), Monterey (12.6) o Big Sur (11.6)
- Procesador: Cualquier procesador Intel o AMD x86-64 (con el conjunto de instrucciones AVX2)
- RAM: 4 GB (8 GB)
- Almacenamiento: 4-6 GB Instalación con AppDesigner.
- Gráfica: tarjeta gráfica acelerada por hardware compatible con OpenGL 3.3 (con 1GB de GPU)

-Normas de utilización y limitaciones

- Se debe avanzar por los “tabs” siguiendo el orden en el que aparecen en el menú superior.
- Realizar las acciones correspondientes en cada “tab” antes del avance.
- Introducir o modificar los parámetros de entrada entre las opciones disponibles o dentro de los límites que se permita. Si un valor condiciona directamente a otro fuera de su rango, se mostrará un mensaje de aviso.
- Ejecutar el archivo de la aplicación en el directorio que contenga todas las funciones (.m) y tablas (.mat) que conforman el código, y los archivos de imagen que forman parte de la interfaz gráfica.

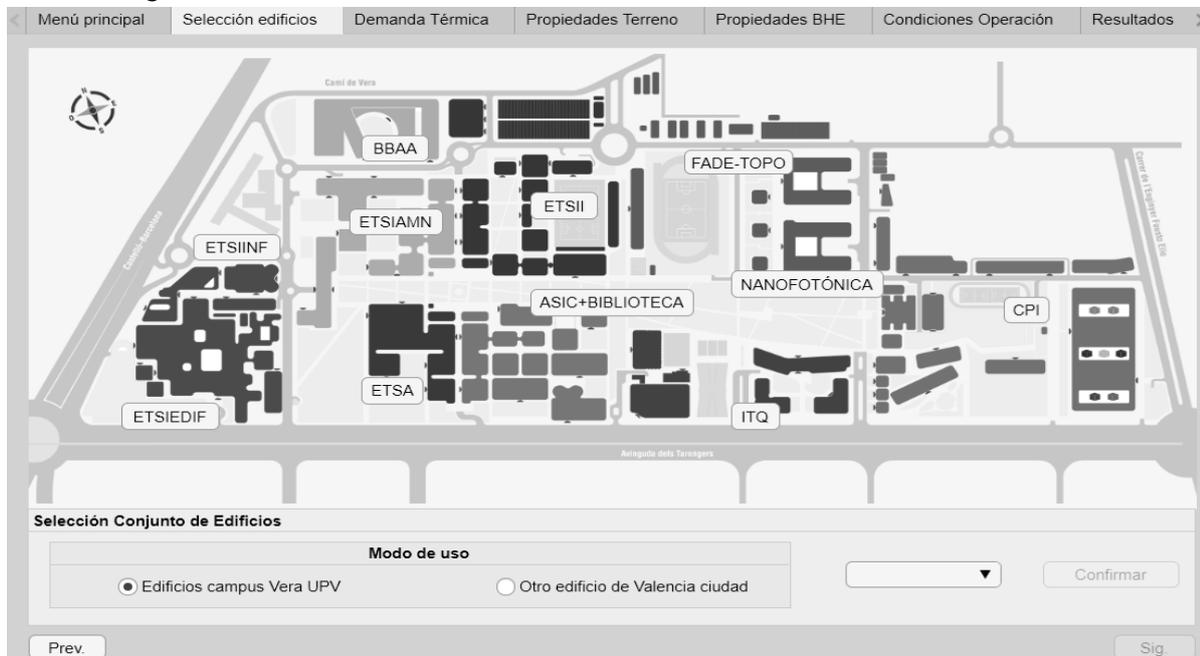
-Interfaz de usuario

Fig. 1: Menú principal



Presionar Start para comenzar el diseño (Fig. 1).

Fig. 2: Selección de edificios



Marcar una de las opciones disponibles y confirmar para avanzar (FIG. 2).

Fig 3: Demanda térmica

Autocompletar los valores pulsando los botones que se indican en función de la opción escogida, o introducirlos manualmente a partir de la carga anual o el perfil mensual, y del factor de uso (Fig.3).

Fig.4: Propiedades del terreno

Escoger la temperatura y la conductividad térmica en el terreno (Fig.4).

Fig.5: Propiedades del BHE

Marcar las características de la sonda, el pozo y el relleno entre las opciones disponibles (Fig.5)

Fig.6: Condiciones de operación

Seleccionar las temperaturas en el intercambiador, el COP en función de la BCG marcada y la turbulencia mínima en el intercambiador (Fig.6).

Fig.6 (2): Condiciones de operación

The screenshot displays two side-by-side panels for 'Características del fluido' (Fluid Characteristics).
Left Panel:
 - Fluido seleccionado: Agua
 - Propiedades: Densidad (kg/m3) = 999.9, Calor específico (J/kgK) = 4196, Viscosidad dinámica (kg/ms) = 0.001408.
 - Caudal circulante total: 0 m3/h.
 - Temperaturas de entrada al intercambiador: T ent. en Refrigeración = 35 °C, T ent. en Calefacción = 5 °C.
 - Botón: Sig.

Right Panel:
 - Fluido seleccionado: Anticongelante (dropdown menu open showing options: 10% Propylene glycol, 10% Propylene glycol, 20% Propylene glycol, 30% Propylene glycol, 10% Ethylene glycol, 20% Ethylene glycol, 30% Ethylene glycol).
 - Propiedades: Densidad, Calor específico, Viscosidad dinámica (values are partially obscured by the dropdown).
 - Caudal circulante total: 89.59 m3/h.
 - Temperaturas de entrada al intercambiador: T ent. en Refrigeración = 35 °C, T ent. en Calefacción = 4.5 °C.
 - Botón: Sig.

Al confirmar las opciones, el fluido caloportador y sus propiedades vienen determinados por la temperatura de entrada en el BHE. También se calcula el caudal total circulante. (Fig.6(2))

Fig.7: RESULTADOS

The screenshot shows the 'Resultados' (Results) tab of the software.
Resistencia térmica del conjunto (mk/W):
 - Resistencia térmica del terreno: 0.000
 - Resistencia térmica del borehole: 0
Longitud Total Intercambiador enterrado:
 - Longitud calculada Refrigeración: 0 / 0 m
 - Longitud calculada Calefacción: 0 / 0 m
 - Long. Total del Intercambiador: 0 m
Perforaciones y características:
 - Longitud por borehole: 100 m
 - Long. Instalada: 0 m
 - Nº Perforaciones: 0
 - Caudal/borehole (m3/h): 0
 - NºRe Calculado: 0
Rendimiento medio estacional:
 - Calefacción SCOP: 0.00
 - Refrigeración SEER: 0.00
 - Botones: Obtener Resultados, Calcular, Prev., Sig.

Se calcula la resistencia térmica del conjunto, junto a la longitud total de intercambiador en función de la longitud por pozo que se introduzca. También se obtiene la eficiencia energética de la instalación (Fig.7).

Fig.8: COSTES

The screenshot shows the 'COSTES' module with the following data:

Coste energético (Consumo Bomba de calor)			
Precio En. eléctrica (€/kWh)	<input type="text" value="0.14"/>	Nº años	<input type="text" value="25"/>
		Coste medio anual	<input type="text" value="0"/>
Aumento anual de la tasa de interés		<input type="text" value="1.4"/>	%
		Costes energético total	<input type="text" value="0"/>

Costes Perforación	
Precio por metro perforado (Long.+Sonda+Relleno)	<input type="text" value="75"/> (€/mPerf)
Coste perforaciones	<input type="text" value="0"/>

Coste Instalación geotérmica	
Coste estimado por kW térmico de la instalación	<input type="text" value="1400"/> (€/kW)
Coste Total	<input type="text" value="0"/>

Buttons: Prev., Calcular, Sig.

Obtiene el gasto energético anual y en el periodo de simulación, y los costes de perforación y de la instalación. Estos dependen del precio del kWh, y del precio por metro perforado y kW instalado que el usuario introduzca (Fig.8).

Fig.9: AHORROS

The screenshot shows the 'AHORROS' module with the following data:

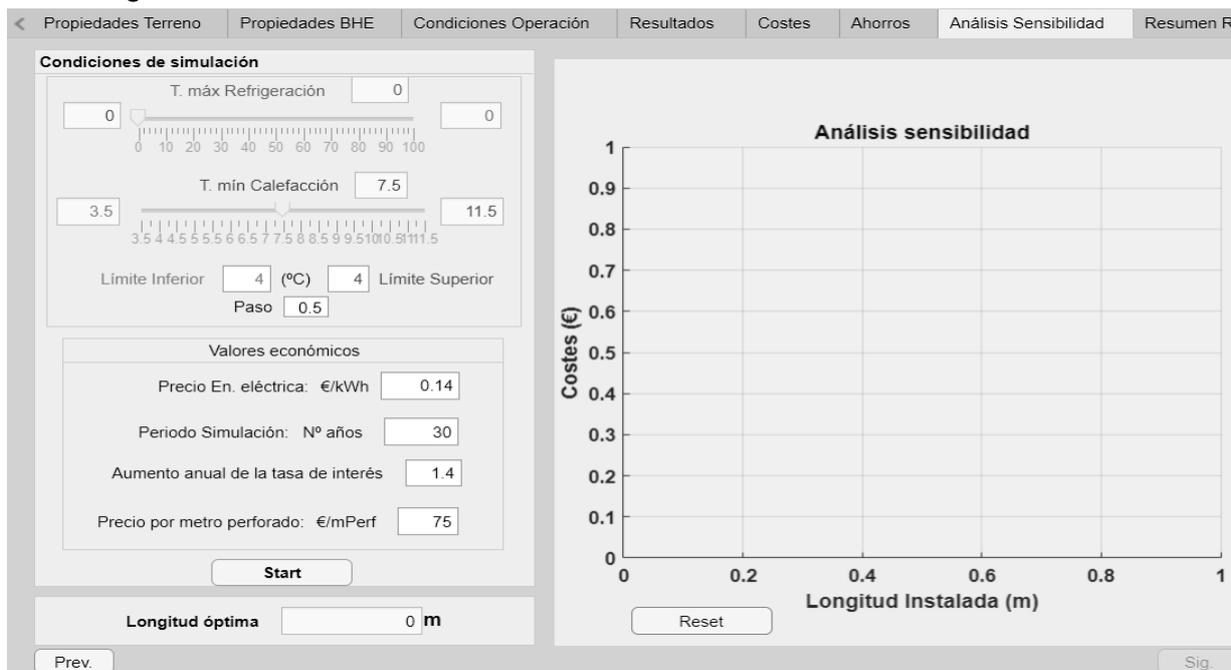
Ahorro Energético Anual			
Consumo energético (Actual)	<input type="text" value="0"/>	kWh/año	
Consumo Energético (Geotermia)	<input type="text" value="0"/>	kWh/año	
Ahorro energético (Climatización)	<input type="text" value="0"/>	kWh/año	
Ahorro económico	<input type="text" value="0"/>	€/año	

Ahorro Emisiones	
Factor de Emisión	<input type="text" value="0.357"/> kgCO2/kWh
Emisiones evitadas	<input type="text" value="0"/> kgCO2/año

Buttons: Prev., Calcular, Sig.

Calcula el ahorro obtenido con respecto a la situación actual con la nueva eficiencia, y las emisiones de CO2 evitadas a la atmósfera (Fig.9).

Fig.10: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Simula de nuevo el cálculo de instalaciones al variar el valor de las temperaturas en el intercambiador y el resto de las condiciones que se precie. Al presionar en start, se grafica para cada opción la longitud obtenida y los costes de instalación y perforación, así como la suma de ambos en función de esta (Fig. 10). Al coste total mínimo se le asocia una longitud óptima y posteriormente se comparan los resultados previos con los obtenidos en el análisis de sensibilidad (Fig.11)

Fig.11: RESUMEN DE LOS RESULTADOS

