



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS HORIZONTALES PLANOS CON DIFERENTES TIPOS DE RELLENO

AUTORA: Carmen María Miñana García

TUTOR: Borja Badenes Badenes

COTUTOR: Miguel Ángel Mateo Pla

Curso Académico: 2020-21

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerles a mi tutor, Borja Badenes Badenes, y mi cotutor, Miguel Á. Mateo Pla, la orientación y ayuda que me han brindado durante el desempeño del trabajo.

También a mi madre, por todo el apoyo que me ha dado durante esta etapa.

Y, por último, a mis amigos, por haberme dado tan buenos recuerdos y haber hecho más ameno este camino.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

RESUMEN

El presente proyecto estudia y caracteriza la influencia de utilizar materiales de cambio de fase, PCMs, como parte del relleno de una zanja para una instalación geotérmica de poca profundidad horizontal. Para ello, se han realizado dos instalaciones de iguales características, en el laboratorio geotérmico de la Universidad Politécnica de Valencia. Las zanjas se han rellenado con materiales diferentes, una con material de relleno común y otra con los mismos materiales, pero se ha añadido un porcentaje de PCM, para comprobar si su uso mejora la eficiencia térmica del intercambiador geotérmico.

Se han utilizado en cada zanja 4 paneles de captación geotérmica compactos, y para poder llevar a cabo el análisis se han puesto 21 sondas que registran la temperatura, repartidas en cada zanja en los mismos puntos para ambas, además de disponer del sistema de registro de datos del laboratorio.

En primer lugar, se ha introducido agua en los intercambiadores y se ha registrado la temperatura durante un período de tiempo. Luego, se ha hecho una recirculación, y tras esto, se ha pasado a la inyección de calor, mediante la inserción de agua a alta temperatura con un valor constante durante aproximadamente 5 días. Finalmente, se ha parado la inyección térmica y registrado la disipación de calor. Durante todos estos períodos se han almacenado datos de las temperaturas en intervalos de tiempo de alrededor de 1 minuto.

Para analizar el registro de las temperaturas se ha utilizado Matlab, en primer lugar, se ha visualizado la evolución de la temperatura en cada sonda en el tiempo y en la entrada y salida. Posteriormente, se ha hecho una interpolación del registro de todas las sondas para todo el intervalo de tiempos y espacio, de forma que se ha visualizado la distribución de temperaturas en los paneles y la zanja durante la inserción de calor.

Finalmente, mediante los datos registrados durante la inserción de calor se ha obtenido la resistencia térmica del pozo, que determina la eficiencia del intercambiador.

Se ha cuantificado el coste de la instalación para llevar a cabo este análisis mediante un presupuesto.

Palabras clave: geotermia, ensayos térmicos, intercambiador enterrado horizontal, rendimiento térmico, material de cambio de fase (PCM).

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

RESUM

El present projecte estudia i caracteritza la influència d'utilitzar un material de canvi de fase, PCM, com a part dels materials de farcit d'una rasa per a una instal·lació geotèrmica de poca profunditat horitzontal. De forma que s'han realitzat dos instal·lacions amb les mateixes característiques, en el laboratori geotèrmic de la Universitat Politècnica de València. Les rases s'han omplit amb materials diferents, una amb material de farcit comú i una altra amb els mateixos materials, però s'ha afegit un percentatge de PCM, per a comprovar si el seu ús millora l'eficiència tèrmica de l'intercanviador geotèrmic.

S'han utilitzat en cada rasa 4 panells de captació geotèrmica compactes, i per a poder dur a terme l'anàlisi s'han posat 21 sondes que registren la temperatura, repartides en cada rasa en els mateixos punts per a les dos, a més del disposar del sistema de registre de dades del laboratori.

En primer lloc, s'ha introduït aigua en els intercanviadors i s'ha registrat la temperatura durant un període de temps. Després, s'ha fet una recirculació, i seguidament s'ha passat a la injecció de calor, per mitjà de la inserció d'aigua a alta temperatura amb un valor constant durant aproximadament 5 dies. Finalment, s'ha parat la injecció tèrmica i registrat la dissipació de calor. Durant tots estos períodes s'han emmagatzemat dades de les temperatures en intervals de temps d'al voltant d'1 minut.

Per a analitzar el registre de les temperatures s'ha utilitzat Matlab, en primer lloc, s'ha visualitzat l'evolució de la temperatura en cada sonda en el temps i en l'entrada i eixida. Posteriorment, s'ha fet una interpolació del registre de totes les sondes per a tot l'interval de temps i espai, de manera que s'ha visualitzat la distribució de temperatures en els panells i la rasa durant la inserció de calor.

Finalment, per mitjà de les dades registrats durant la inserció de calor s'ha obtingut la resistència tèrmica del pou, que determina l'eficiència de l'intercanviador.

S'ha quantificat el cost de la instal·lació per a dur a terme esta anàlisi per mitjà d'un pressupost.

Paraules clau: geotèrmia, assajos tèrmics, intercanviador soterrat horitzontal, rendiment tèrmic, material de canvi de fase (PCM)

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

ABSTRACT

This project studies and characterizes the influence of using a phase change material, PCM, as part of the grouting of a trench for a horizontal shallow geothermal installation. To do this, two installations with the same characteristics have been made, in the geothermal laboratory at the Polytechnic University of Valencia. The trenches have been filled with different materials, one with common grouting and the other with the same materials, but a percentage of PCM has been added to it, to check if its use improves the thermal efficiency of the geothermal heat exchanger.

Four compact geothermal panels have been used in each trench, and to carry out the analysis 21 probes that record the temperature have been installed in each trench at the same points for both, in addition to the system for recording data that the laboratory already had.

In first place, water has been introduced into the exchangers and the temperature has been recorded over a period. Then, a recirculation has been made, and after this, the next thing done was the injection of heat, by inserting water at high temperature with a constant value for approximately 5 days. Finally, thermal injection has been stopped and the heat dissipation has been recorded. During all these periods, temperature data has been stored intervals of about 1 minute.

To analyze the temperature record, Matlab has been used, firstly, the evolution of the temperature in each probe and in the input and output over time has been represented. Later, an interpolation of the record of all the probes has been made for the entire time interval and space, so with that the distribution of temperatures in the panels and the trench during the insertion of heat has been visualized.

Finally, with the data recorded during the insertion of heat, the thermal resistance of the borehole has been obtained, which determines the efficiency of the exchanger.

The cost of the installation to carry out this analysis has been quantified by a budget.

Keywords: geothermal, thermal response test, horizontal heat exchanger, thermal performance, phase change material (PCM)

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO 1: MEMORIA.....	7
DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO	55
DOCUMENTO 3: PLANOS	63
DOCUMENTO 4: ANEXOS	67

DOCUMENTO 1: MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	Objeto del Trabajo.....	10
1.2.	Motivación y Justificación	10
1.3.	Energía Geotérmica y Bombas de Calor Geotérmicas	11
1.4.	Intercambiadores Geotérmicos Horizontales	14
1.5.	PCMs.....	17
1.6.	Antecedentes	19
2.	INSTALACIÓN DE LOS PANELES GEOTÉRMICOS	22
3.	ENSAYOS TÉRMICOS.....	29
3.1.	Objetivos	29
3.2.	Protocolo	30
3.3.	Resultados	32
3.3.1.	Previo a la Inyección de Calor	32
3.3.2.	Recirculación	34
3.3.3.	Inyección de Calor	35
3.3.4.	Recuperación.....	39
4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	41
4.1.	Visualización de la Evolución Térmica.....	41
4.2.	Rendimiento Térmico a partir de Modelos de Temperatura Constante	48
5.	CONCLUSIONES	52
6.	REFERENCIAS.....	53

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de la temperatura para diferentes profundidades medido en la estación de pruebas de Schwalbach en Alemania.	11
Figura 2: Intercambiadores de calor geotérmicos: A la izquierda sistema abierto, arriba a la derecha sistema cerrado en bucle vertical y abajo a la derecha sistema cerrado en bucle horizontal con configuración en paralelo.	13
Figura 3: Configuraciones de tubos para intercambiadores horizontales: Arriba a la izquierda de 2, 4 y 6 tubos, arriba a la derecha 'Slinky', abajo a la izquierda alfombra de tubos y abajo a la derecha cesta de tubos.	15
Figura 4: Ubicación del Testsite en la Universidad Politécnica de Valencia.	22
Figura 5: Ubicación de la zanja dentro del Testsite.	22
Figura 6: Configuración de los intercambiadores de calor y el material aislante con el suelo que conforma la pared adiabática en la zanja.	23
Figura 7: Intercambiador de calor GeoFlow.	24
Figura 8: Conexiones de las sondas en el interior de la zanja.	24
Figura 9: Disposición de las sondas en el interior de la zanja. Las numeradas en color verde son las explicadas en a) y las que se encuentra en blanco las de b).	25
Figura 10: Esquema del sistema de adquisición de datos.	26
Figura 11: Materiales de relleno en las zanjas.	27
Figura 12: Código de colores seguido en las gráficas de las sondas.	31
Figura 13: Gráfica de la evolución de la temperatura registradas durante la circulación de agua.	32
Figura 14: Gráfica de la evolución de la temperatura registradas durante la recirculación de agua.	34
Figura 15: Gráficas de la evolución de la temperatura en las sondas durante la inyección de calor.	35
Figura 16: Numeración de mayor a menor temperatura de las sondas en la zanja 1.	36
Figura 17: Numeración de mayor a menor temperatura de las sondas en la zanja 2.	36
Figura 18: Gráfica de la evolución de las temperaturas de entrada y de salida de las zanjas durante la inserción de calor.	37
Figura 19: Gráfica de la potencia instantánea disipada por las zanjas.	38
Figura 20: Gráfica de la evolución de la temperatura en las sondas en el período de recuperación.	39
Figura 21: Gráfica de la evolución de las temperaturas de entrada y de salida de las zanjas durante la recuperación.	40
Figura 22: Distribución de las temperaturas para las 0.1 horas del período considerado.	42
Figura 23: Distribución de las temperaturas para las 5 horas del período considerado.	42
Figura 24: Distribución de las temperaturas para las 10 horas del período considerado.	43
Figura 25: Distribución de las temperaturas para las 20 horas del período considerado.	43
Figura 26: Distribución de las temperaturas para las 50 horas del período considerado.	44
Figura 27: Distribución de las temperaturas para las 115 horas del período considerado.	44
Figura 28: Distribución de las temperaturas para las 120 horas del período considerado.	45
Figura 29: Distribución de las temperaturas para las 130 horas del período considerado.	45
Figura 30: Distribución de las temperaturas para las 150 horas del período considerado.	46
Figura 31: Distribución de las temperaturas para las 160 horas del período considerado.	46

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Figura 32: Gráficas de la potencia disipada frente la temperatura de entrada y de salida.....	48
Figura 33: Geometría de la parte de la zanja que contiene material de relleno.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los recursos geotérmicos por su temperatura (Lee, 2001).....	12
Tabla 2: Composición del material de relleno de las dos zanjas.....	27
Tabla 3: Características del relleno con PCM.....	28

ÍNDICE ECUACIONES

(1)	49
(2)	49
(3)	49
(4)	49
(5)	50
(6)	50
(7)	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto del Trabajo

El objeto del presente Trabajo de Fin de Grado es la caracterización y estudio de las diferencias en el comportamiento térmico que produce la utilización de dos tipos de materiales de relleno diferentes, uno cemento normal y otro cemento con un porcentaje de un material de cambio de fase, PCM, en un intercambiador de calor horizontal para una instalación de energía geotérmica somera. Se hará mediante la inyección de un escalón de calor durante 120h igual en ambos intercambiadores, introduciendo agua a una temperatura constante entre 40°C y 45°C. Se registrarán las temperaturas en diversos puntos de la zanja cada cierto intervalo de tiempo, antes del escalón de calor, para conocer el estado inicial del terreno, durante el escalón y después de este, para comprobar el comportamiento de ambos durante la recuperación térmica. Para ello, se han realizado dos instalaciones de intercambiadores de calor horizontales de iguales características en el laboratorio geotérmico ubicado en la Universidad Politécnica de Valencia, con el mismo número de sondas y en la misma ubicación para cada uno.

1.2. Motivación y Justificación

En la época en la que nos encontramos actualmente en la que se tiene un consumo energético cada vez mayor, debido al aumento de la población mundial y unas exigencias de confort cada vez mayores, y el cambio climático se ha convertido en unos de los mayores problemas al que nos enfrentamos, el desarrollo de fuentes energéticas alternativas a las convencionales que no produzcan emisiones, pero cubran la demanda de la misma forma, es una necesidad.

La energía geotérmica tiene el potencial de ser una de estas alternativas. Las bombas de calor acopladas al suelo se han reconocido como una tecnología energética capaz de climatizar edificios residenciales, industriales y comerciales de tamaños pequeños hasta grandes de forma respetuosa con el medio ambiente y eficientemente, convirtiéndolo también en una solución rentable. Sin embargo, no está tan presente como otras energías renovables hoy en día, debido a que el auge en estas es más reciente, origen, sobre todo, por la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración con bajo consumo por el endurecimiento de la legislación sobre eficiencia energética para edificios. Es por ello, de vital interés el desarrollo e investigación de intercambiadores para este tipo de instalación con las mejores prestaciones posibles para que sea una solución competitiva en el mercado energético.

1.3. Energía Geotérmica y Bombas de Calor Geotérmicas

La energía geotérmica, acorde a la definición de la Directiva 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (Parlamento Europeo, 2018, 11 de diciembre), es *la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida*. En este mismo documento se establece que para ser considerada como una energía renovable ha de cumplir que el consumo de energía primario necesario para que funcione la bomba de calor, que extrae o inyecta el calor en el suelo, sea muy inferior a la energía obtenida, teniendo que cumplir que el factor de rendimiento medio estacional, SPF, sea mayor a 1,15 partido la eficiencia del sistema de energía, η , fijado en un mínimo de 45,5%, en la Decisión 2013/114/UE por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías (Parlamento europeo, 2013, 1 de marzo), de forma que el SPF ha de tener un valor superior a 2,5.

Este calor puede proceder de diversas fuentes. Una de estas fuentes son las reacciones que se dan en el núcleo de la Tierra que provocan un flujo de calor hacia la superficie, de unos 6 kWh/m^2 en esta, creando un gradiente geotérmico que se promedia del orden de 3°C por cada 100m de profundidad. Otra fuente, es la radiación solar que llega a la superficie terrestre, la media absorbida de esta por el suelo es de alrededor de unos 1500 kWh/m^2 , sin embargo, se suele considerar que la temperatura de la superficie solo tiene impacto sobre la temperatura de la tierra durante los primeros 10m de profundidad.

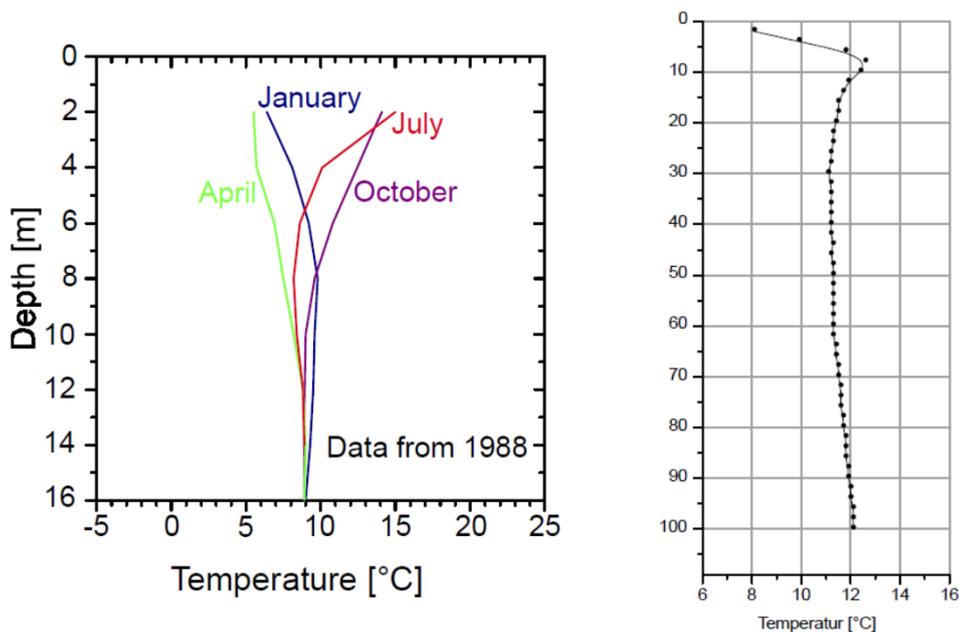


Figura 1: Evolución de la temperatura para diferentes profundidades medido en la estación de pruebas de Schwalbach en Alemania.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Los recursos geotérmicos se suelen clasificar por el rango de temperatura del yacimiento, sin embargo, no hay una clasificación universal.

	Baja entalpía	Media entalpía	Alta entalpía
Muffler y Cataldi (1978)	<90°C	90-150°C	>150°C
Haenel, Rybach y Stegena, (1988)	≤150°C	-	>150°C
Hochstein (1990)	<125°C	125-225°C	>225°C
Benderitter y Cormy (1990)	<100°C	100-200°C	>200°C

Tabla 1: Clasificación de los recursos geotérmicos por su temperatura (Lee, 2001).

Se han hecho otras clasificaciones según la exergía disponible, también clasificándolos en alta, media y baja entalpía, y según la profundidad diferenciando entre geotermia somera y profunda, con la que tampoco hay un acuerdo general, pero se establece, por lo general, que los someros son aquellos que buscan el aprovechamiento térmico, y no la producción eléctrica, mediante el uso de las temperaturas no tan elevadas que se tienen a una profundidad de unos 100 metros hasta la superficie.

Este trabajo se va a centrar en la geotermia de baja entalpía también conocida como geotermia somera.

La utilización de la energía geotérmica a poca profundidad se lleva a cabo mediante dos métodos:

- a) Uso de bombas de calor para la extracción de calor o inyección de frío (Ground Source Heat Pumps, GSHP).
- b) Almacenamiento de calor, frío o ambos, subterráneo (Underground Thermal Energy Storage, UTES)

Hay diferentes métodos de intercambio de calor con el suelo, pero estos se diferencian en dos grandes grupos: sistemas abiertos y sistemas cerrados.

Los sistemas abiertos usan como fluido caloportador agua subterránea y es esta la que se utiliza directamente en la bomba, estos se sitúan en acuíferos que han de cumplir unas características, como que tengan suficiente permeabilidad y buenas

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

propiedades químicas, y habitualmente se hacen dos pozos uno para la extracción del agua y otro para su reinyección. La profundidad es de entre 4m a hasta más de 50m.

Para los sistemas cerrados se introduce un intercambiador de calor en el suelo recorrido por un fluido caloportador que introduce o extrae el calor del suelo y es este el que circula por la bomba. Las dos configuraciones principales que se dan es bucle en horizontal, en los que la principal fuente de calor es la radiación solar y la profundidad es de entre 1.2m a 2m, y en vertical, que se beneficia de la temperatura constante que hay a partir de 10 metros aproximadamente, y las profundidades en este van desde los 10m hasta los 250m. La elección del fluido caloportador y el acoplamiento entre el intercambiador y el circuito de refrigeración de la bomba de calor tiene una gran importancia en los sistemas cerrados, lo más común y lo que se va a utilizar en la instalación de este trabajo, es usar agua circulando por bombeo entre el circuito enterrado y el intercambiador, y en este el calor se cede a otro fluido que es el que va a la bomba de calor, y según el lugar de la instalación se le adicionará anticongelante o no. También hay otros sistemas usados en menor medida como los sistemas de expansión directa utilizados en intercambiadores horizontales en el que el fluido caloportador es el que circula en la bomba de calor y no hay intercambiador ni bomba de circulación, y los ‘tubos de calor’, heat pipes, que se usan en sistema verticales y en este caso se tienen dos fases en el intercambiador enterrado y solo sirve para calefacción.

Por último, hay que añadir que hay algunos sistemas, como puede ser el agua de minas o túneles, no se clasifican como sistemas abiertos o cerrados.

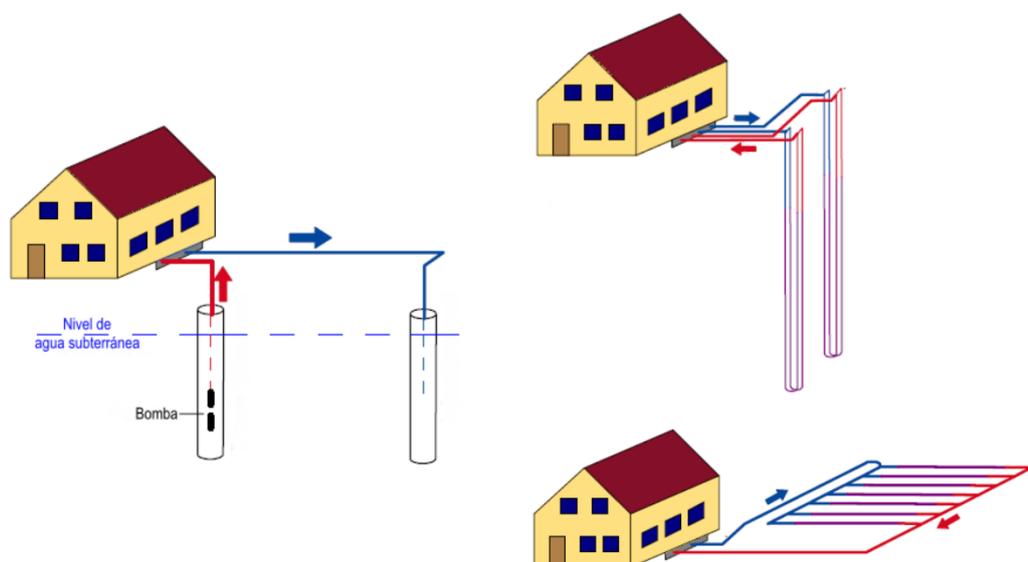


Figura 2: Intercambiadores de calor geotérmicos: A la izquierda sistema abierto, arriba a la derecha sistema cerrado en bucle vertical y abajo a la derecha sistema cerrado en bucle horizontal con configuración en paralelo.

1.4. Intercambiadores Geotérmicos Horizontales

La instalación de análisis para este trabajo está constituida por un intercambiador horizontal. Estos no se encuentran a suficiente profundidad para considerar la temperatura del terreno constante por lo que tienen dependencia de la radiación solar y, por tanto, del cambio estacional, lo que puede implicar una reducción de la eficiencia. En contraposición, mirando al largo plazo esta influencia implica que no se tengan derivas térmicas. Una de sus mayores ventajas es que no se suele necesitar equipo de perforación, ya que normalmente es suficiente con excavar zanjas.

Existen diferentes tipos de configuraciones para intercambiadores horizontales y se seleccionará una u otra en función de las posibilidades, la facilidad de excavación y las demandas caloríficas del edificio a abastecer. Algunas de las posibles configuraciones son de dos, cuatro o seis tubos en paralelo por zanja con el espacio adecuado entre estos. Por otra parte, hay una serie de configuraciones que tienen un mayor ratio de extracción de potencia por m^2 , entre estos están los intercambiadores 'Slinky', en los que el tubo se pone en espiral, intercambiadores con los tubos haciendo una cesta e intercambiadores de alfombra de tubos, por último, también hay intercambiadores de pozo horizontales más similares a los intercambiadores verticales pero es menos común. El intercambiador que se va a utilizar en este trabajo no está formado por tubos, por lo que no sigue ninguna de estas configuraciones, es un módulo, mezcla de un colector clásico y un tanque de almacenamiento de hielo.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.



Figura 3: Configuraciones de tubos para intercambiadores horizontales: Arriba a la izquierda de 2, 4 y 6 tubos, arriba a la derecha 'Slinky', abajo a la izquierda alfombra de tubos y abajo a la derecha cesta de tubos.

Los principales mecanismos de transferencia de calor del intercambiador con el terreno son la conducción y la convección, la radiación es despreciable, que se dé más de un mecanismo u otro depende del tipo de roca y de las características térmica del terreno, y estas varían mucho dependiendo de la ubicación. Las propiedades térmicas para las rocas que más relevancia tienen en este ámbito son la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la difusividad térmica. Estas se encuentran recogidas y definidas en tablas para diferentes minerales y metales, dependiendo de la potencia nominal de la instalación geotérmica será suficiente con esto y mapas geológicos, o será necesario un Test de Respuesta Térmica (TRT).

En concreto, la conductividad térmica, que relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura y se mide en unidades de $W/(m \cdot K)$, define la transmisión de calor por conducción, ya que esta está directamente relacionada con la diferencia de temperatura. No solo hay que tener en cuenta la conductividad térmica de las rocas, sino que también de los poros y la que hay en el contacto de roca y poro, es más, los poros juegan un papel muy importante puesto que la conductividad térmica varía mucho si están rellenos de aire, que es aislante, o de agua.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

La transmisión de calor por convección solo se tiene en cuenta si hay poros puesto que este mecanismo solo se da en líquidos y gases, ya que consiste en la absorción de calor por parte del fluido y el desplazamiento de este hacia una zona más fría cediéndole el calor a esta. No se define mediante ninguna de las propiedades térmicas de las rocas enumeradas anteriormente puesto que intervienen muchos parámetros, tanto térmicos como hidráulicos, y se necesita hacer simulaciones para caracterizarlo.

En conclusión, los rendimientos del suelo y las rocas que se encuentra alrededor del intercambiador y la influencia en estos de la presencia de agua o flujos de agua dictaminan la eficacia del intercambiador.

En los intercambiadores horizontales, sin embargo, se suelen instalar en el suelo porque para las pocas profundidades y grandes superficies, en comparación con las superficies de los intercambiadores verticales, a las que se trabaja no es viable económicamente perforar roca, a no ser que se haga por otro motivo y se aproveche para hacer la instalación. Así que los parámetros que son de interés para intercambiadores horizontales son la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica del suelo, los cuales están condicionados por el tamaño de grano, la humedad, la densidad aparente y el clima.

Como ya se ha mencionado, para la determinación de estos parámetros necesarios para el diseño del intercambiador de calor se utiliza principalmente el Test de Respuesta Térmica (TRT). Este consiste en introducir un escalón de potencia térmica al terreno y analizar cómo se comporta, para ello se toman medidas de temperatura a la entrada y salida del intercambiador, la ambiente y del terreno, así como del caudal de agua que está circulando por el intercambiador. En una instalación horizontal no se suele realizar un TRT porque a estas profundidades es más económico excavar y estimar o medir las propiedades del suelo, así que su uso principal es para dimensionar intercambiadores verticales. En menor medida también se usa para el análisis de los tipos de intercambiadores y del material de relleno, como es el caso.

1.5. PCMs

Con la finalidad de tener un buen contacto térmico con el suelo se puede poner un material de relleno para ocupar el espacio entre la pared de la zanja y el intercambiador que tenga una mayor conductividad térmica que el relleno natural, que es el propio material extraído del suelo que se ha excavado. Estos rellenos, conocidos como ‘Grouting’, tienen la capacidad de adherirse tanto al intercambiador como a la pared de la zanja. Ha sido objeto de desarrollo materiales de rellenos especiales que mejoren la transmisión de calor ya que es un parámetro muy importante en el rendimiento del sistema geotérmico, debido a que dictamina la temperatura alrededor del intercambiador de calor que determina la temperatura del fluido que va a la bomba de calor y, por tanto, el coeficiente de rendimiento de esta, el COP. En este trabajo se va a rellenar una zanja con un grouting común y otra con este mismo grouting pero con adición de un porcentaje de material de cambio de fase, conocido como PCM, Phase Change Materials.

Los PCMs son materiales que liberan o absorben grandes cantidades de calor latente al cambiar de fase líquida a sólida o viceversa, esto ocurre cuando alcanzan su temperatura de punto de fusión o solidificación, y durante el proceso de absorción o liberación de este calor el material se encuentra a esta temperatura de forma que es constante. El cambio de fase más interesante, debido a que el volumen ocupado por el material no sufre una gran variación, es el de sólido a líquido, aunque la energía almacenada no es la mayor de todos los posibles cambios de fase.

Existen diferentes grupos de materiales de cambio de fase y se seleccionará uno u otro, para una aplicación en particular, según sus propiedades térmicas, en concreto la más importante para su elección, sobre todo en la aplicación para los sistemas geotérmicos, es su temperatura de fusión. Los PCM que realizan un cambio de fase sólido-líquido para una temperatura de entre 20°C y 80°C, que son los que se utilizan en aplicaciones geotérmicas se pueden clasificar según su naturaleza química en orgánicos, que son más estables, e inorgánicos, donde centrándonos en los más comunes se tiene una subclasificación, que es para ambos igual, diferenciando entre eutécticos y compuestos. En el caso de los materiales eutécticos se tiene solamente las mezclas eutécticas, en las que se tiene dos componentes y la temperatura de solidificación es más baja que el de los compuestos individualmente, y para los compuestos en el caso de ser orgánico se tienen las parafinas, con un calor latente de hasta 200kJ/kg, y ácidos grasos, que tienen un calor latente similar que al de las parafinas pero son más caros, y en el caso de inorgánicos las sales hidratadas, que son baratas y con un calor latente de casi el doble que las parafinas pero con temperaturas de fusión bajas y con el problema de que sufren corrosión con metales.

El suelo tiene una difusividad térmica baja, en comparación con la de las rocas, por lo que su respuesta térmica tiende a ser más lenta que los cambios de las demandas de la bomba, esto puede provocar una disminución del COP. Los PCMs se han planteado como una solución a esto debido a que el suelo no recibe todo el calor o frío

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

que inyecta la bomba de calor gracias a su temperatura constante en el proceso de cambio de fase, de forma que se reduce la fluctuación de la temperatura del suelo y la temperatura extrema que alcanza el suelo es inferior para una misma longitud de intercambiador. En zonas frías, además, el uso de PCM puede evitar la congelación del fluido de trabajo que recorre el intercambiador, de forma que funcionan como un dispositivo de protección.

Sin embargo, los PCM presentan una desventaja y es que la mayoría tienen conductividades térmicas bajas, ya que el beneficio del uso de estos reside en el uso del calor latente, por lo que en períodos que no se alcanza la temperatura de fusión se pueden obtener rendimientos inferiores que con un material de relleno común con una conductividad térmica mayor.

1.6. Antecedentes

Durante los últimos años se han llevado a cabo investigaciones sobre el uso de PCM en intercambiadores de calor geotérmicos enfocadas hacia obtener mejores rendimientos en la bomba de calor, por una mayor estabilidad de la temperatura del suelo, en el caso de los intercambiadores horizontales y para acortar la longitud de los pozos con los mismos flujos de potencia en los intercambiadores verticales, también han habido estudios sobre el almacenamiento de calor subterráneo, los UTES anteriormente mencionados, con PCM para las dos configuraciones. A continuación, se detallan algunos de estos estudios, así como los resultados alcanzados, que sirven de precedentes para este trabajo de final de grado.

En uno de los primeros estudios, (Eslami-nejad & Bernier, 2013), se propuso el uso de PCM mezclado con arena, para tener una conductividad térmica mayor de la que se tendría solo con el PCM, alrededor del intercambiador de calor geotérmico. El objetivo era que parte del calor cuando se tienen cargas máximas se utilice para fundir el PCM, de forma que se ralentice el aumento de temperatura del fluido de retorno a la bomba de calor y en períodos no pico cuando la bomba no está funcionando la energía almacenada en el PCM se libere al suelo por conducción. La instalación consistió en un pozo con configuración de tubo en U para un edificio típico residencial ubicado en Miami con una carga máxima de 9,8 kW y se seleccionó un PCM de hidrato de sal con temperatura de fusión de 32°C. El análisis se hizo mediante un modelo 1D y los resultados obtenidos fueron que el grosor óptimo del anillo de PCM con arena era de 4.1 cm y que con este se conseguía una reducción del 9% en la longitud necesaria de intercambiador, pero aumento ligeramente, en un 2.7%, el consumo de la bomba de calor. Se concluyó que a medida que se ponía mayor grosor del anillo de PCM y arena permitía una mayor reducción del intercambiador porque se tenía más transferencia de calor.

En otra investigación, (Bottarelli, y otros, 2014), se usó PCM mezclado con material de relleno para un intercambiador de calor horizontal de panel plano. El análisis se hizo mediante modelos numéricos y se consideró que el sistema era para un edificio residencial ubicado al norte de Italia. Se resolvieron casos con y sin PCM para un período de dos años y el PCM utilizado fue parafina. Los resultados que se obtuvieron indican que gracias al uso de PCM se puede suavizar la onda térmica del suelo, mejorar el COP de la bomba y con la cantidad adecuada de PCM, evitar el agotamiento térmico en invierno cargando el PCM en verano de forma natural. La carcasa sin PCM alcanzaba una temperatura máxima de 30°C mientras que la que tiene PCM de 26°C en verano, y en invierno la que no contiene PCM una mínima de -6°C y la que contiene PCM de -1°C, es decir, las temperaturas son más bajas en verano y más altas en invierno y por ello hay un aumento del COP de la bomba de calor.

Un tercer análisis, (Bottarelli, Bortoloni, & Su, 2015), tuvo como objeto el estudio del uso de una mezcla de PCM con diferentes puntos de fusión, para alcanzar la temperatura de fusión en invierno y verano, como material de relleno de la zanja de un

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

intercambiador de calor geotérmico horizontal y su comparación con una zanja con las mismas características, pero rellena de grava gruesa. Se utilizó una configuración de 2 tubos y se analizó durante un año para un edificio residencial. El análisis se hizo mediante un modelo de elementos finitos 2D y los resultados obtenidos fueron que con el PCM, dimensionado adecuadamente, se tienen valores más estables y favorables del fluido de trabajo haciendo que se dé una amortización de las ondas de térmicas producidas por la inyección y extracción de calor en el suelo y se tenga unas mejores condiciones de trabajo en la bomba de calor, a excepción de primavera y otoño, períodos en lo que no se alcanza la temperatura de fusión y por la baja conductividad de los PCM se tiene una menor eficiencia en la bomba que con la grava gruesa.

Se realizó un proyecto, (Qi, Pu, Sun, & Li, 2016), en el que se investigó el uso de PCM como material de relleno para mejorar el rendimiento de los sistemas geotérmicos con intercambiador horizontal, por la suavización de la onda térmica. Se estudiaron cuatro materiales de relleno, el suelo común, parafina RT27, que es un producto comercial, ácido, que era una mezcla de ácido cáprico y ácido láurico, y ácido mejorado, al que se le aumento la conductividad añadiendo partículas metálicas, y se utilizó un intercambiador de tipo U con cargas de un edificio de oficinas estándar. Los resultados se obtuvieron mediante métodos numéricos con un modelo 3D y estos fueron que el PCM presenta ciertos beneficios frente el suelo común, como que el radio de efectos térmicos disminuye, en el mejor de los casos que es con ácido, hasta casi un 35%.

Por último, un proyecto más reciente, (Yang, Xu, Yang, & Yang, 2019), en el que se estudió el rendimiento experimentalmente, así como mediante simulación, de un intercambiador de calor geotérmico de pozo con una longitud inferior a 1,2m relleno con PCM. El estudio se realizó para verano e invierno y se obtuvo como resultado que el radio de interferencia térmica del suelo con relleno de PCM es de 86,5% y de 87,8%, para verano e invierno respectivamente, del que se tiene con relleno del mismo suelo, debido a que el PCM puede aumentar la tasa de intercambio de calor del intercambiador, en un 9,4% para verano y un 28% para invierno, y retrasar la variación de temperatura del suelo. Como PCM se usó una mezcla de ácido mixto, que da mejores resultados en verano, y ácido oleico, con el que se tienen mejores resultados en invierno, y se obtuvo que la relación de masa tenía una gran influencia sobre los resultados, obteniendo para una relación de masa de 4:6 el radio mínimo de interferencia térmica que fue de 0,47. Se llegó a la conclusión que era necesario usar un PCM con un valor de calor latente elevado y que se debía encontrar un tiempo óptimo de operación del intercambiador y recuperación del PCM.

Como se puede observar la mayor parte de los estudios que se han realizado sobre este tema están llevados a cabo mediante simulación numérica y son más escasos los estudios que se han hecho experimentalmente. Concretamente, de los 5 estudios mencionados que tienen similitud con el trabajo que se está realizando en el presente documento solo uno de ellos es experimental, el último, y el intercambiador no se introdujo en el suelo, sino que se construyó una caja de madera cuadrada de 1,2m cada lado. Por tanto, el presente trabajo tiene especial interés ya que los estudios se van a

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

realizar sobre un intercambiador en el suelo que podría ser parte de una instalación real para una vivienda.

2. INSTALACIÓN DE LOS PANELES GEOTÉRMICOS

La instalación está ubicada en el Testsite de la Universidad Politécnica de Valencia, al lado oeste del Laboratorio Geotérmico del grupo de investigación ICTvsCC (Site Hub en la Figura 5: Ubicación de la zanja dentro del Testsite.).



Figura 4: Ubicación del Testsite en la Universidad Politécnica de Valencia.

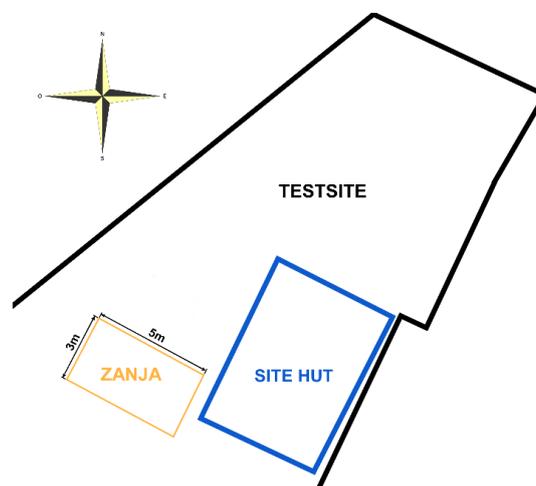


Figura 5: Ubicación de la zanja dentro del Testsite.

Para llevarla a cabo se ha excavado una zanja de aproximadamente 3 metros de ancho por 5 metros de largo de una profundidad de 1,5m. Se han instalado dos grupos de intercambiadores de calor, separados por una pared adiabática para que no haya interferencia térmica entre ellos. La pared adiabática se ha hecho ubicando material aislante a la parte interior de cada grupo de intercambiadores e insertando el material del

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

suelo excavado entre los dos aislantes. El material aislante utilizado ha sido lana de roca.

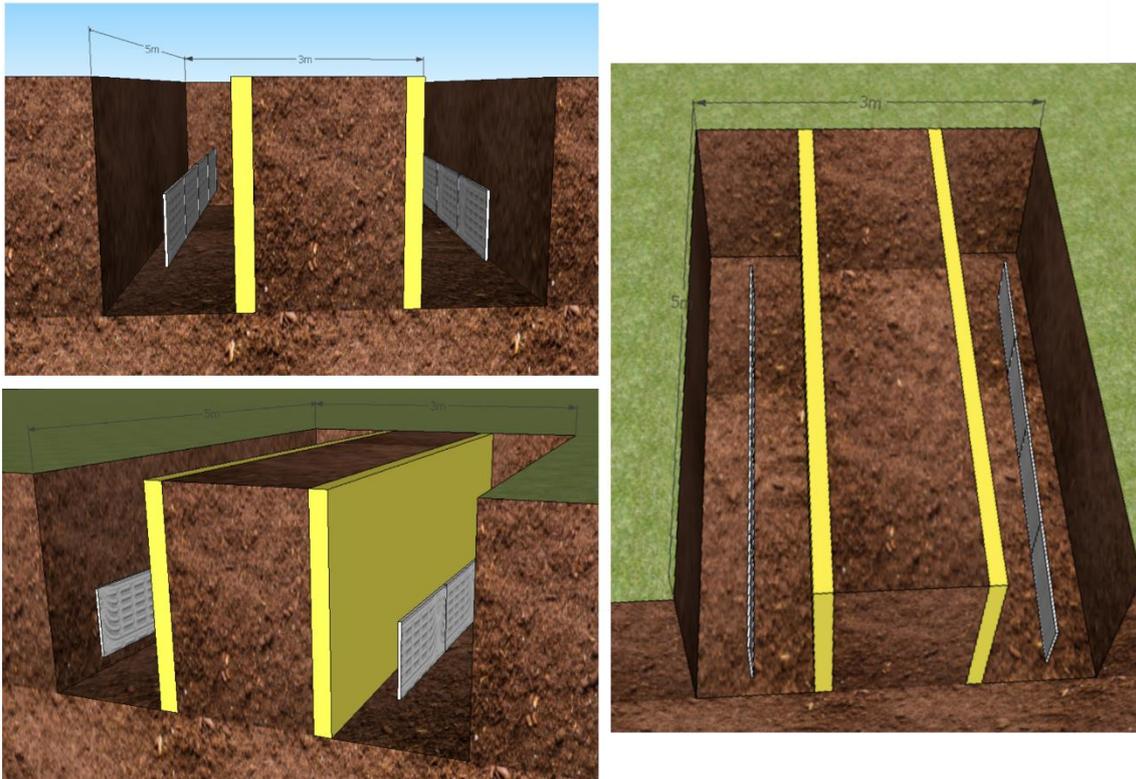


Figura 6: Configuración de los intercambiadores de calor y el material aislante con el suelo que conforma la pared adiabática en la zanja.

Cada grupo de intercambiadores de calor está compuesto por 4 módulos. Los módulos utilizados son los intercambiadores horizontales de la marca 'GREENHEISS', el modelo 'GeoFlow', que es un intercambiador compacto que requiere muy poco espacio. Según la hoja de características del fabricante, cada módulo disipa una potencia de 99,83W para un caudal de 5 l/min con un salto térmico de 3K y 25% de Etilenglicol. En este caso se alimentará por una tubería DN32 cada rama con 5 l/min, pero con agua sin Etilenglicol y con un salto de temperatura que se estima de 1,5°C, aunque como se va a inyectar a temperatura alta constante puede que sea mayor.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.



Figura 7: Intercambiador de calor GeoFlow.

Se han instalado 42 sondas que miden la temperatura en diferentes puntos en el interior de las zanjas, que se utilizarán para registrar la evolución térmica durante los ensayos.



Figura 8: Conexiones de las sondas en el interior de la zanja.

Las sondas se han instalado con la siguiente configuración:

- a) 3 sondas a la profundidad media del módulo y en el centro de este, a varias distancias del eje de simetría:

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

- Una sobre el mismo módulo.
- Una desplazada en el lado opuesto de la pared adiabática a 13cm del módulo.
- Una la misma dirección que la anterior, pero a 26cm.

Por lo que esto supone, 3 sondas en los 4 módulos para los 2 ramales, un total de 24 sondas.

b) 3 sondas a la salida de cada módulo, a excepción del último, que se encuentran:

- Una en la parte superior del módulo pegada a este, que desde la superficie está a una profundidad de 1,15m.
- Una en la misma posición que la anterior, pero en la parte inferior, en lugar de en la superior, que, por lo tanto, está a una profundidad de 1,5m.
- Una a la altura media del módulo, 1,325m desde la superficie, que para el primer módulo y tercero se encuentra sobre el suelo en la pared de la zanja, que son 26cm desde el módulo, y en el caso del segundo, sobre la pared adiabática, que son 26cm desde el módulo también, pero en dirección contraria.

Se tiene, por lo tanto, 3 sondas a la salida de 3 módulos para los 2 ramales, que hace un total de 18 sondas.

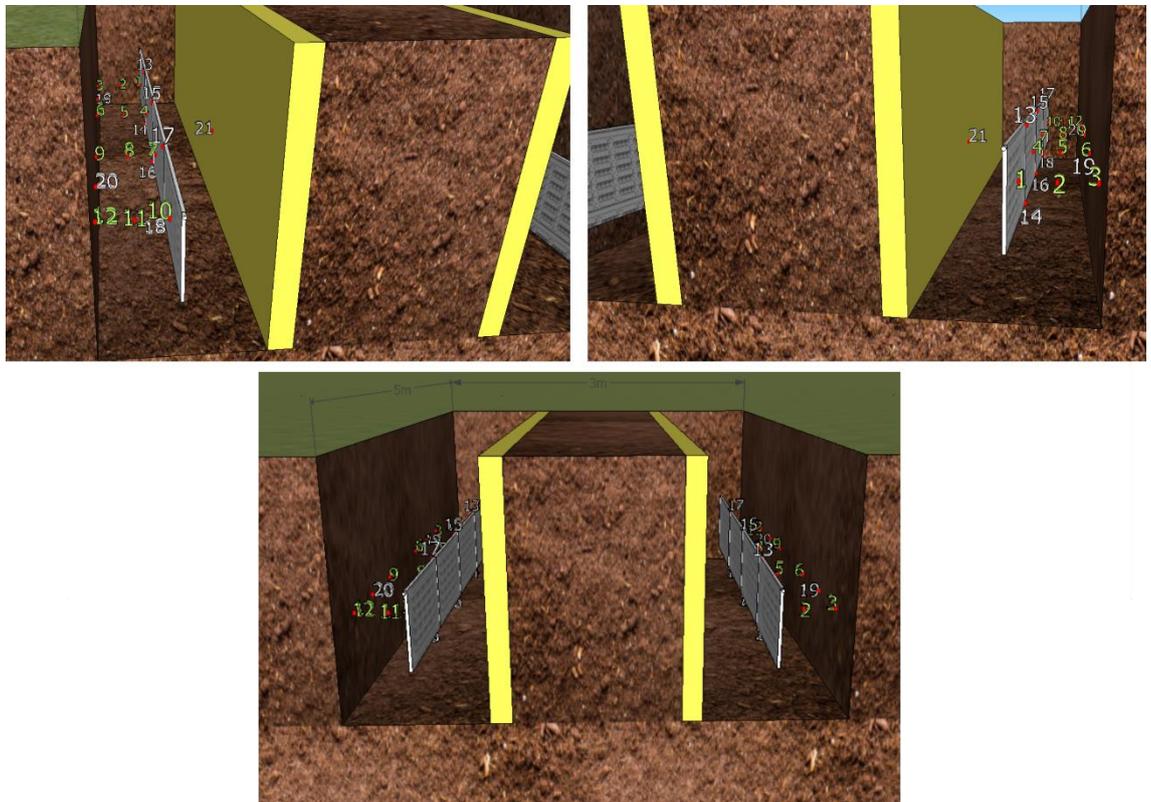


Figura 9: Disposición de las sondas en el interior de la zanja. Las numeradas en color verde son las explicadas en a) y las que se encuentra en blanco las de b).

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Además, se miden también las temperaturas a la entrada y a la salida del agua de cada ramal a la altura del suelo mediante el sistema de adquisición de datos que ya se tenía en el Testsite. La configuración se puede encontrar en el Plano 1. Configuración de los sensores. Alzado. y Plano 2. Configuración de los sensores. Planta.

Las sondas utilizadas son los sensores de temperatura STS35-DIS de Sensirion que tiene una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ para un rango de temperatura entre 20 y 60°C . Están conectadas en multiplexores de 8 entradas, un multiplexor es un dispositivo que dispone de varias entradas de datos, pero de una única salida, de forma que se puede utilizar un único medio de transmisión, como hay 42 sondas se tienen 6 multiplexores y en cada uno hay una entrada sin conexión. Las salidas de los multiplexores están cada una conectadas a un bus I^2C , que es un sistema de comunicación que permite transmitir datos bidireccionalmente mediante tres líneas, una de datos, otra para sincronizar estos y una de conexión a tierra, y dos resistencias, una para cada una de las dos primeras líneas mencionadas. Habitualmente, en los I^2C las conexiones para que las lecturas sean precisas y no se tenga mucho ruido no se utilizan cables de más de 2m, en este caso, para poder llegar a los paneles han sido necesarios cables de 5'5m, por lo que, para no tener una mala lectura, en el interior del I^2C se han utilizado una resistencia muy pequeña, de 2 ohmios, cuando habitualmente son del orden de kilohmios. Los buses I^2C se conectan en grupos de tres a un HUB, es decir, hay un HUB para cada zanja, y finalmente, estos se han conectado a un ordenador desde donde se pueden visualizar los datos y almacenarlos, un HUB es un dispositivo que transmite la información que recibe de forma secuencial de cada uno de los dispositivos que tiene conectados hasta un puerto USB.

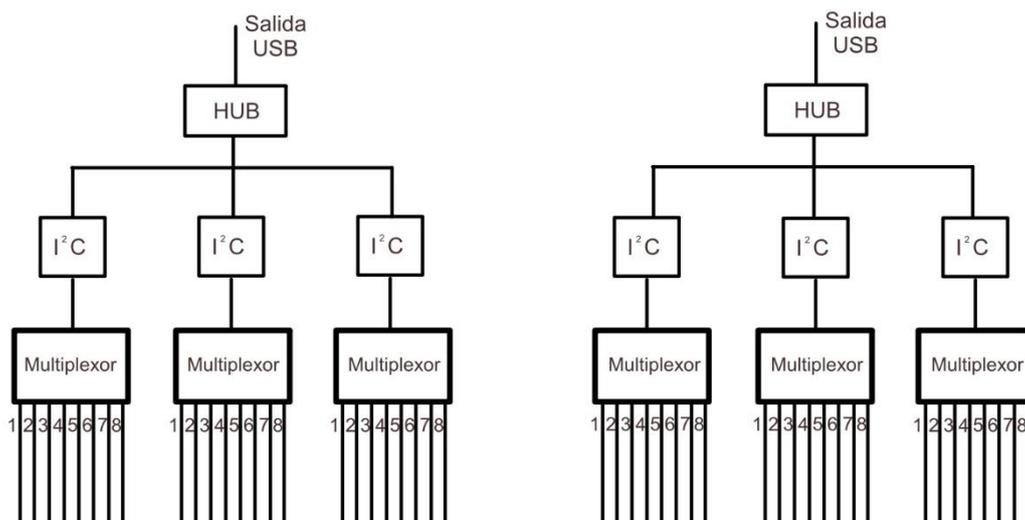


Figura 10: Esquema del sistema de adquisición de datos.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Para la alimentación con agua a la misma temperatura a los dos ramales se ha instalado un colector, con la configuración que se puede ver en el Plano 3. Conexiones hidráulicas en planta.

Como se ha mencionado anteriormente, las zanjas se han rellenado para cada configuración de intercambiadores con materiales diferentes. El ramal que se encuentra más al norte de acuerdo con la Figura 5: Ubicación de la zanja dentro del Testsite. se ha rellenado con grouting común, posteriormente para los análisis será la zanja 1, mientras que el otro es el que contiene PCM, que se le denominará zanja 2.

	Zanja 2 con PCM (6 hormigoneras)			Zanja 1 sin PCM (7 hormigoneras)		
	Masa por hormigonera (kg)	Total (kg)	% en seco	Masa por hormigonera (kg)	Total (kg)	% en seco
Cemento Portland	37.50	225	16,97	37.50	262.50	18.36
Arena	140	840	63,35	140	980	68.56
PCM	12.50	75	5,66	0	0	0
Agua	70	420	31,67	50	350	24.49
Plastificante	0.20	1.20	0,09	0.20	1.40	0.10
Total	260.20	1561.20		227.70	1593.90	
Total seco	190	1141.20		177.70	1243.90	

Tabla 2: Composición del material de relleno de las dos zanjas.



Figura 11: Materiales de relleno en las zanjas.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

El PCM utilizado es el CrodaTherm™ ME29P, que es un PCM comercial orgánico de base biológica obtenido a partir de fuentes naturales renovables. Es una alternativa a las parafinas, que se obtienen como derivado de petroquímicos, y de los hidratos de sal, que presentan problemas de inestabilidad en aplicaciones estacionarias con el tiempo. La tecnología utilizada son unas microcápsulas formadas por un núcleo de unas partículas obtenidas a partir de materias primas vegetales, y la corteza, que hace que el núcleo este encapsulado, es acrílica. Debido al encapsulamiento las partículas permanecen sólidas cuando el núcleo cambia de fase. El núcleo es fácilmente biodegradable y está clasificado como no inflamable. Presenta una temperatura de fusión de 28.8°C y un calor latente de 183 kJ/kg. Al mezclarlo con el cemento con las proporciones establecidas en la Tabla 2: Composición del material de relleno de las dos zanjas. las características que se tienen del material obtenido son las que se pueden observar en la siguiente tabla.

	Conductividad térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Capacidad calorífica específica $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$	Calor latente $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Temperatura de cambio de fase (°C)
Relleno con PCM	1.025	1625.25	1593.1506	24.36	28.8

Tabla 3: Características del relleno con PCM.

El relleno sin PCM, por otra parte, tiene una conductividad de $1.1085 \frac{W}{m \cdot K}$ y una densidad de $1786.75 \frac{kg}{m^3}$.

3. ENSAYOS TÉRMICOS

3.1. Objetivos

Los objetivos que se tienen de la realización de ensayos térmicos son:

-Caracterizar y analizar lo que ocurre en el interior de la zanja con la inyección de calor viendo cómo se comportan los materiales de relleno utilizados en cada una de las zanjas.

-Estudiar la evolución de las temperaturas en el espacio y en el tiempo según las sondas de temperatura instaladas.

-Observar diferencias en el rendimiento térmico en cada de las zanjas.

-Determinar si el uso del PCM presenta ventajas frente el uso de material de relleno común.

3.2. Protocolo

El protocolo seguido para llevar a cabo los ensayos térmicos en los intercambiadores es el siguiente. El primer paso tras el fin del proceso de instalación es el purgado, con el cual se elimina el aire y limpia y extrae la suciedad que pueda haberse acumulado en los paneles durante el montaje, el proceso consiste en bombear agua hasta que sale completamente limpia. Tras esto se ha podido empezar con los ensayos, en primer lugar, se ha introducido agua en el intercambiador y se ha mantenido en este durante unas 90 horas. Posteriormente, se ha realizado una recirculación de agua, es decir, el agua a la salida de los intercambiadores se volvía a llevar a la entrada de estos mediante una válvula de 3 vías, se ha hecho durante un poco más de 25 horas. En tercer lugar, se ha pasado a la inyección de calor, mediante agua a una temperatura constante de 43°C durante aproximadamente 120 horas, casi 5 días. El agua se ha calentado mediante una resistencia en un tanque de acumulación e inyectado de forma controlada mediante un PID electrónico, que es un mecanismo de control que funciona mediante retroalimentación. Por último, una vez finalizada la inyección de calor, se han registrado datos durante un período aproximadamente de 35 horas para ver cómo se comportaban las zanjas durante la recuperación térmica. Se han registrado datos durante un total de unas 250 horas.

El sistema de captación de datos mediante las sondas ha hecho lecturas de la temperatura durante todo el proceso en intervalos de aproximadamente un minuto, siendo la diferencia de las lecturas dentro de los diferentes grupos de conexiones entre las sondas de décimas de segundo. Para cada tiempo se reciben 9 datos: Un identificador del bus I^2C , que es el sistema de comunicación como se ha explicado en el punto anterior, al que corresponde la lectura, el instante de tiempo de la medición y las temperaturas de las sondas conectadas en el multiplexor de ese bus I^2C , que, aunque son 7 como tiene 8 conexiones llegan este número de datos y la que no tiene sonda el dato obtenido es NaN, que es como se denominan a los valores que faltan y significa que no es número. Los datos se reciben en el software con el que se controla los buses I^2C y estos se guardan en un archivo de tipo CSV, que es un archivo de texto con estructura de tabla que separa con comas las columnas y que puede ser utilizado en Matlab. En el caso del sistema de adquisición de datos del Testsite, para obtener la temperatura de entrada y salida del conjunto de captadores, se han tomado datos cada minuto y se pueden exportar a Excel, este sistema tiene 4 canales de medida, en este caso se han utilizado 2, uno para cada zanja, y han sido el 2 y 3, se ha obtenido un total de 52 columnas de datos, entre ellos los que resultan de interés para el análisis que se va a realizar son el tiempo de la medida, la temperatura a la entrada del pozo, la temperatura a la salida del pozo, la temperatura del terreno sin perturbar, la temperatura ambiente y la potencia disipada.

Para visualizar y analizar los datos se ha utilizado Matlab, que es un entorno de programación utilizado para realizar cálculos numéricos. El código desarrollado se encuentra en el Anexo 1. Código de Matlab. En primer lugar, se han cargado los datos en Matlab, tanto los de las sondas como los del sistema de registro del Testsite. Para

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

poder separar los datos obtenidos por las sondas primero se han definido los identificadores de los buses I^2C , que es para una zanja 'H', la de relleno común, y para la otra 'm', la que contiene PCM, y la configuración de las conexiones de los sensores para cada bus I^2C , que se establece en la parte de 'indices_sensores', así como las coordenadas. Gracias a esto se han podido dividir las columnas de datos en vectores individuales. Se han establecido también vectores de los datos de interés obtenidos desde el Testsite. Tras tener los datos en vectores se han quitado los NaN, que contenían los registros de los sensores, de cada uno y se ha separado por zanjas. Tras esto los datos ya se encuentran en un formato adecuado para trabajar con ellos. En esta primera parte para ver los resultados, antes del siguiente apartado que es donde se analizan, se ha hecho una interpolación de dos dimensiones, de la temperatura y el tiempo, para cada sensor de cada zanja y así tener en las gráficas una representación lineal y no puntos. Se ha hecho mediante una función disponible en Matlab 'griddedinterpolant', que hace una interpolación para cualquier número de dimensiones para un conjunto de datos cuadrículados y dispone de diferentes metodologías, interpolación lineal, interpolación proximal, interpolación spline cúbica y más, en este caso se ha utilizado el método por defecto que es el lineal debido a que da buenos resultados. En el caso de los datos registrados por el sistema del Testsite no se ha hecho una interpolación para realizar las gráficas debido a que no se ajusta bien para ningún método de la interpolación porque se tienen mayores variaciones. Con los datos proporcionados por el sistema del Testsite se ha calculado también la potencia media en el tiempo para cada instalación en cada zanja y por intercambiador. Como ya se había introducido en el punto anterior se ha adoptado la notación de que la zanja 1 es la que contiene material de relleno común y la zanja 2 la que contiene la mezcla con PCM, por lo que en las gráficas que se muestren a continuación seguirán esta nomenclatura.

Las sondas 13, 14 y 21 de la zanja 2 han sufrido algún problema que no se ha podido resolver en la superficie y por la imposibilidad de acceder al interior de las zanjas no se ha podido solucionar por lo que no han registrado datos. El fallo puede ser debido a la temperatura a la que se han visto sometidas o en la adición de los materiales de relleno y la solidificación de estos. Sin embargo, al tener un gran número de sondas el fallo en estas no ha afectado a los ensayos realizados.

El código de colores utilizado en las gráficas de las sondas, con los mismos colores para el mismo número de sonda en ambas zanjas, es el que se puede ver en la figura siguiente.

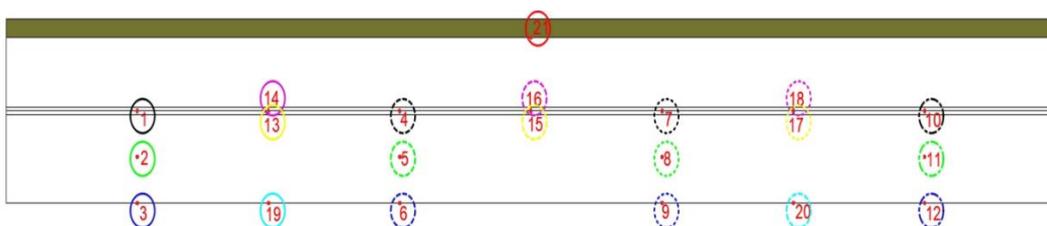


Figura 12: Código de colores seguido en las gráficas de las sondas.

3.3. Resultados

3.3.1. Previo a la Inyección de Calor

Una vez se tienen montado el sistema, tras el transcurso de al menos 25 días, para que el suelo recupere la estabilidad térmica perturbada por el proceso de la instalación, y tras el purgado, se inyecta agua y se mantiene en los intercambiadores durante unas 90 horas, de forma que se caracteriza el estado inicial del terreno. Se ha obtenido la temperatura media en el intercambiador con los datos registrados por el sistema del TestSite que mide la temperatura al principio y final del intercambiador.

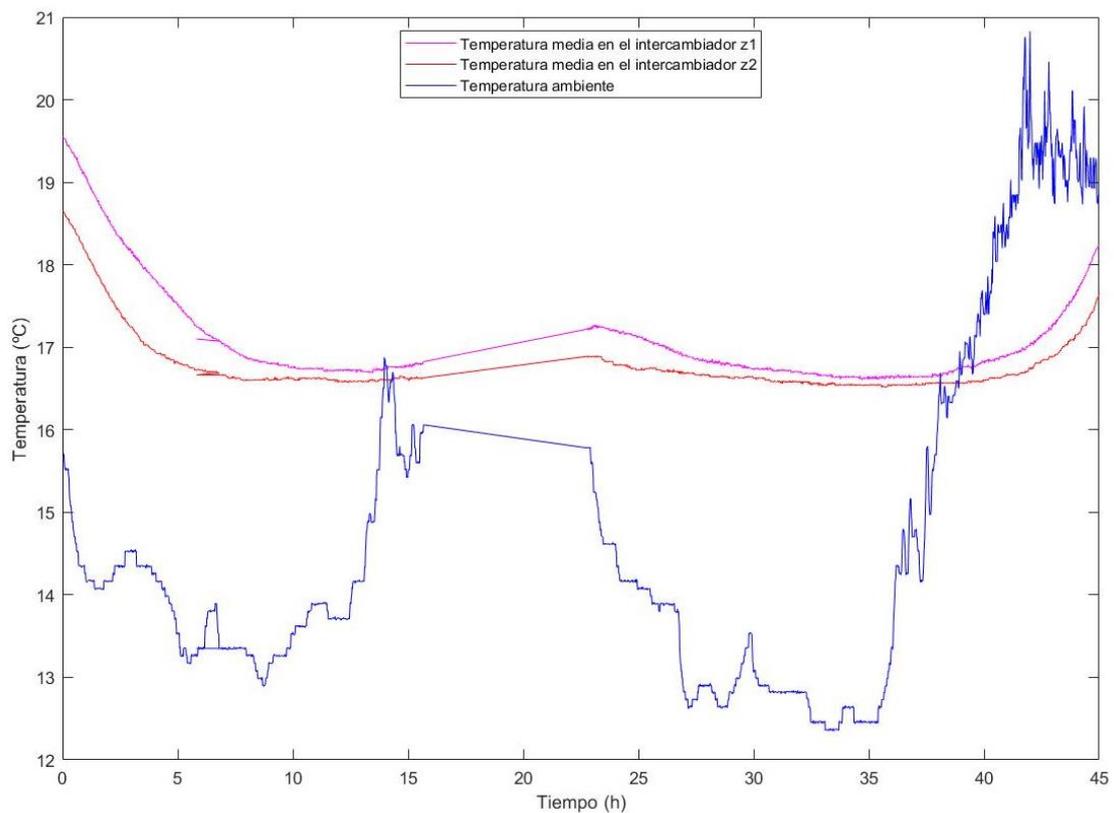


Figura 13: Gráfica de la evolución de la temperatura registradas durante la circulación de agua.

El comportamiento, como se puede apreciar, depende de la temperatura ambiente. La temperatura oscila entre 16.8 y 17.2 °C, mientras la temperatura del suelo sin perturbar medida por una sonda ya instalada en el Testsite, de la cual se reciben los datos en el sistema de registro de este, es de 15.4°C durante todo el intervalo de tiempo. La pequeña variación, inferior a 2°C, se debe a que la sonda que ya se tenía en el Testsite está a una mayor profundidad y no se ve tan afectada por los cambios de

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

temperatura del ambiente. La diferencia entre la zanja 1 y la zanja 2 se debe a que en la zanja 1 se ha introducido el agua a una temperatura alrededor de 19°C y en la zanja 2 alrededor de 18°C.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

3.3.2. Recirculación

El siguiente paso que se ha realizado es la recirculación, que consiste en reintroducir el agua que sale de los intercambiadores en estos. El proceso se lleva a cabo gracias a la válvula de 3 vías que dispone la instalación. Se ha realizado esta fase durante 25 horas.

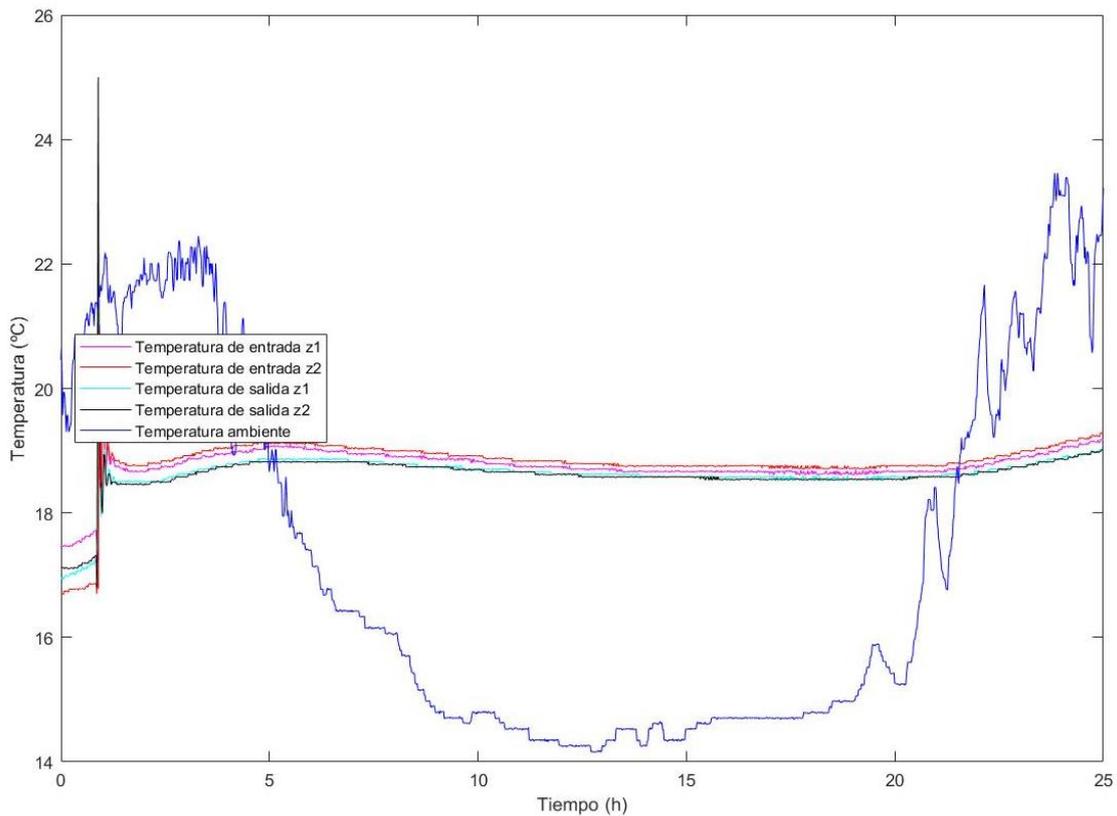


Figura 14: Gráfica de la evolución de la temperatura registradas durante la recirculación de agua.

Durante la recirculación se sigue visualizando la influencia de la temperatura ambiente, pero en la gráfica no se ve tanto el efecto debido a que es un periodo de tiempo mucho más inferior, de un día aproximadamente. La diferencia entre la temperatura de entrada y salida está rondando en torno a 0.5°C. El aumento inicial de la temperatura es debido que en la apertura de la válvula de 3 vías se ha mezclado con agua caliente. La temperatura no se reduce tanto como antes debido a que al inicio del periodo se alcanza una temperatura ambiente de 22°C, muy superior a las que se habían tenido en el paso anterior, por lo que el suelo habrá aumentado su temperatura, y además el agua está circulando y no estática por lo que está menos tiempo en el intercambiador.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

3.3.3. Inyección de Calor

La inyección de calor se ha llevado mediante la inyección de agua caliente a una temperatura constante de 43°C. Se escoge esta temperatura debido a que el relleno de la zanja de PCM tiene una temperatura de fusión de 28.8°C, como se ha enunciado previamente en sus características, asegurando así el cambio de fase. Se realiza la inyección de calor durante unas 120 horas.

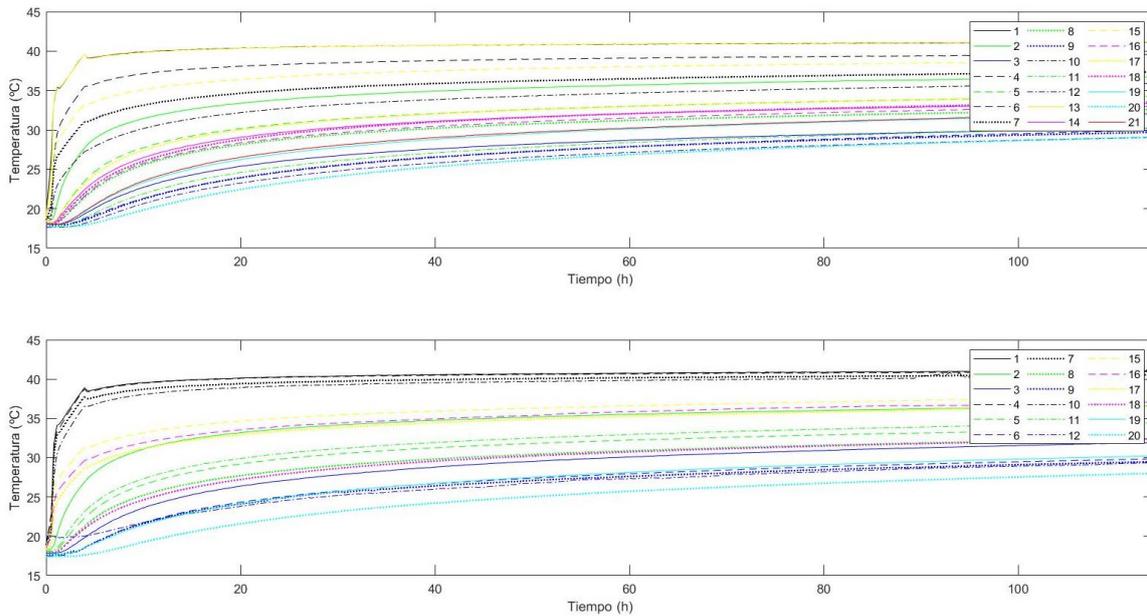


Figura 15: Gráficas de la evolución de la temperatura en las sondas durante la inyección de calor.

En los dos casos anteriores no tenía tanto interés la visualización de los registros de temperatura de todas las sondas, como en este caso, ya que todas registraban una temperatura similar y no aportaba información adicional.

En primer lugar, es conveniente analizar la distribución de las temperaturas en cada zanja a partir de las posiciones de las sondas extraído de la figura anterior.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

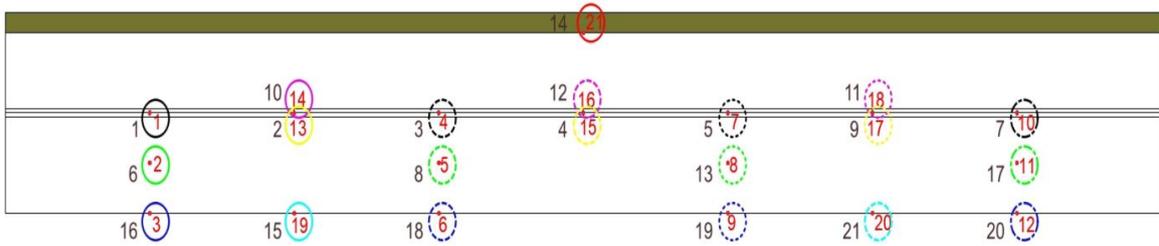


Figura 16: Numeración de mayor a menor temperatura de las sondas en la zanja 1.

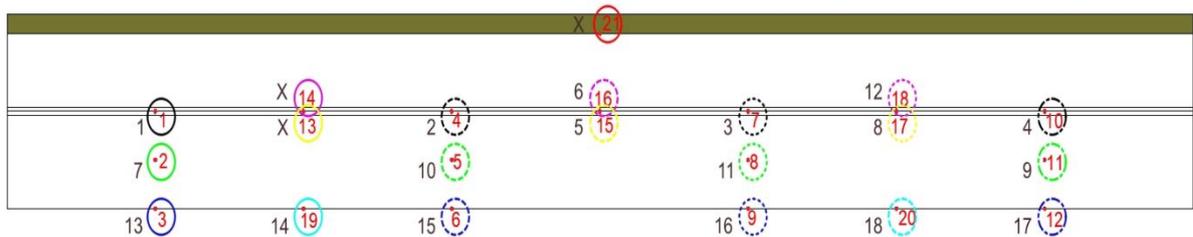


Figura 17: Numeración de mayor a menor temperatura de las sondas en la zanja 2.

En las figuras anteriores se ha numerado cada sonda de mayor a menor temperatura, de esta forma es más fácil ver la distribución de temperaturas que se tiene. Como se puede observar ambas tienen un comportamiento similar, las sondas que registran una mayor temperatura son las que se encuentran sobre el panel en puntos que circula el agua, estas son las sondas de color negro y amarillo. Seguidamente, se tienen las sondas de color verde y magenta que están en el material de relleno, pero próximas a la circulación del agua. Por último, las de color azul y cian que son las más alejadas del paso del agua. La sonda 21 que solo se tiene registro en la zanja 1 está a la misma distancia de la circulación del agua que las de color azul y cian, sin embargo, en este punto se tiene una mayor temperatura, esto es debido a que esta está sobre un aislante adiabático que no deja al calor disiparse como ocurre en los puntos a la misma distancia, pero con suelo delante, esto hace que se tenga una temperatura mayor.

Una vez analizada la distribución de calor para cada zanja, y ver que es similar en ambas, es conveniente mirar la primera figura con las gráficas de las temperaturas registradas por las sondas, donde se ve que la zanja 2 tiene más sondas registrando una temperatura mayor. La zanja 1 tiene 2 sondas con datos alrededor de 40°C mientras que la zanja 2 tiene 4, además la sonda 11 y 16 en el caso de la zanja 2 está a casi 5 grados más que la de la zanja 1. Esto puede ser debido a que la zanja 1 está disipando más calor que la zanja 2.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

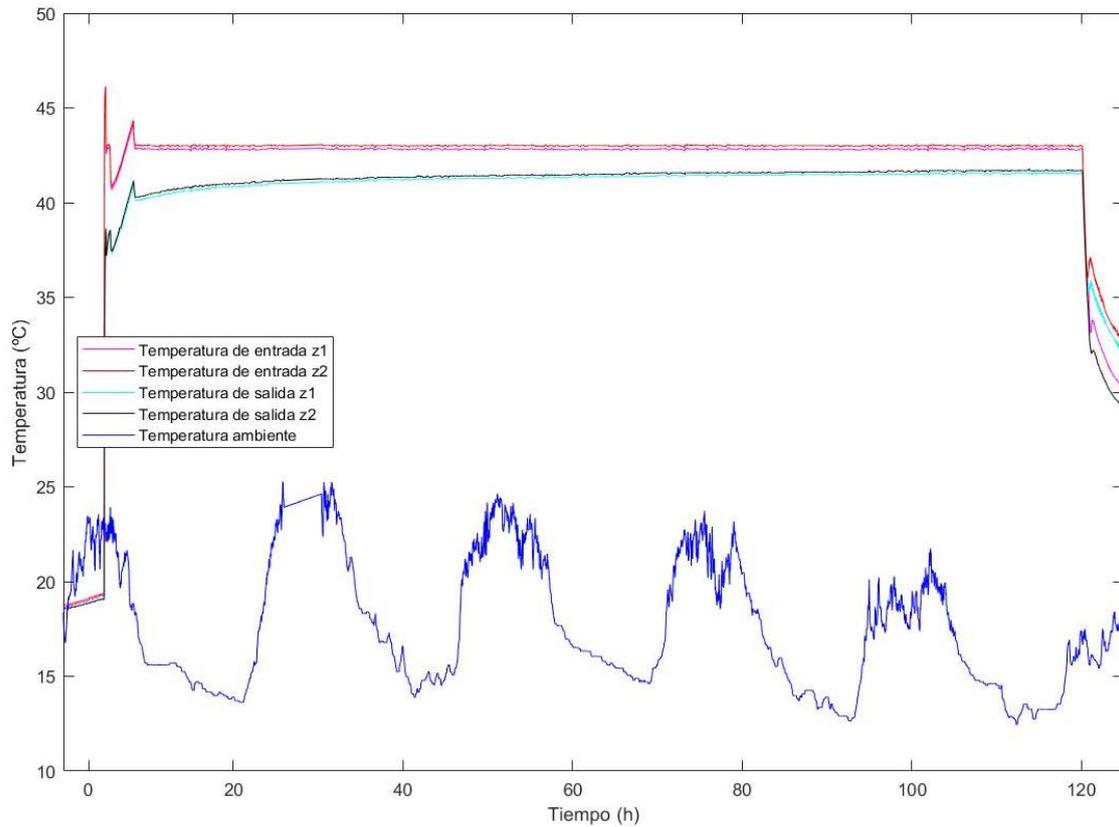


Figura 18: Gráfica de la evolución de las temperaturas de entrada y de salida de las zanjas durante la inserción de calor.

Si se analizan los datos de las temperaturas a la entrada y salida de las dos zanjas mediante la gráfica anterior se puede observar que en ambas se tiene prácticamente la misma temperatura en la entrada y en la salida. La entrada en la zanja 1 es de 42.8°C justo, mientras que en la zanja 2 es de 43°C. En la salida se tiene también la diferencia entre la temperatura de la zanja 1 y la zanja 2, la salida de la zanja 1 es alrededor de 0.1°C inferior que la de la zanja 2, por lo que no hay grandes diferencias en la zanja 1 y la 2. Así que, aunque en la zanja 2 tiene una mayor temperatura a la salida la diferencia comparando con la zanja 1, ésta es muy pequeña, de 0.1°C aproximadamente. No se visualizan oscilaciones en los registros por la temperatura ambiente debido al control que realiza el PID.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

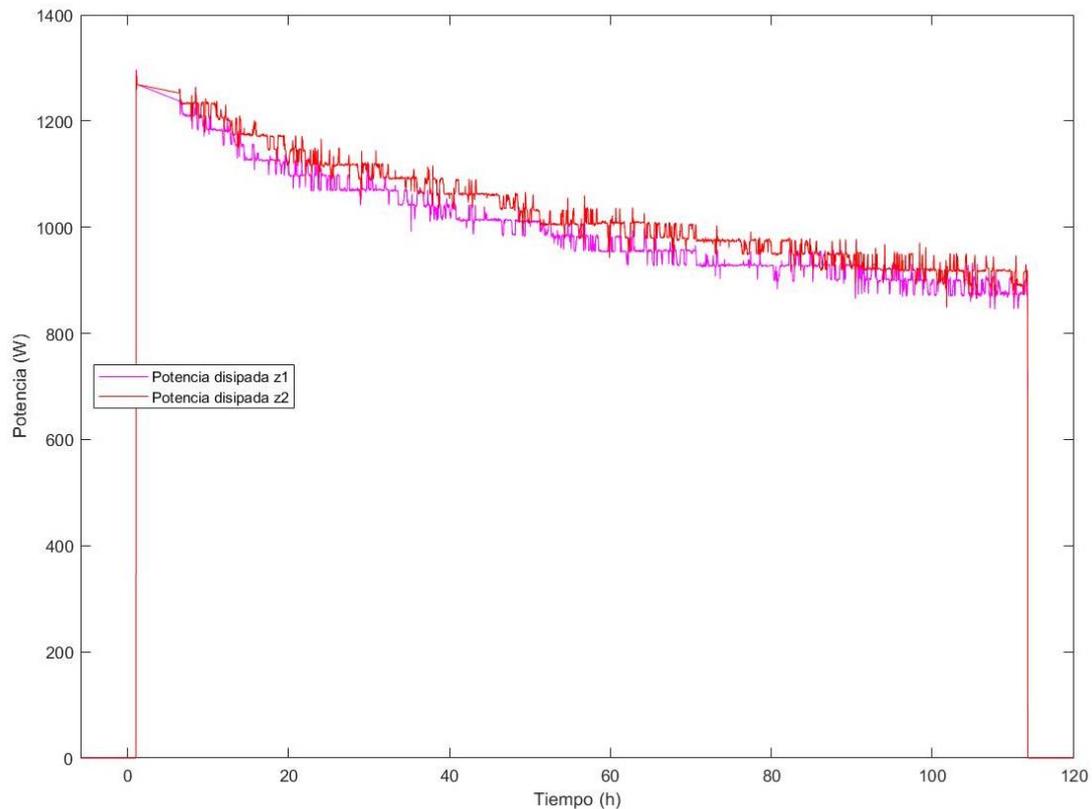


Figura 19: Gráfica de la potencia instantánea disipada por las zanjas.

El mismo sistema de adquisición de datos calcula la potencia instantánea que se está disipando en las zanjas con las temperaturas de salida y entrada y el caudal registrado, como se puede apreciar la zanja 2 está disipando más potencia que la zanja 1. Esto coincide con los datos de la gráfica anterior.

Comparando las dos gráficas anteriores se tiene que la temperatura de salida tiene una tendencia a aumentar y la potencia disipada tiene el efecto contrario, a disminuir. Esto se debe a que el material circundante a los intercambiadores va aumentando su temperatura y, por lo tanto, tiene menor capacidad de disipar el calor y el agua sale a mayor temperatura.

Para finalizar, de la última figura se obtiene que ambas instalaciones disipan una potencia de alrededor de 1100W, en concreto para la zanja 1 de 995W y para la zanja 2 de 1027W. Dividendo entre 4, que es el número de captadores que se tienen, se obtiene para la zanja 1, 249W por captador, y para la 2, 257W por captador. Dicho valor es más del doble del valor de las especificaciones del fabricante y se debe a que se ha operado en unas condiciones extremas, dadas por las temperaturas en el intercambiador más elevadas que en una instalación con bomba de calor geotérmica, que funcionan con una temperatura en el intercambiador geotérmico de 25/35 °C. El salto de temperatura ha sido aproximadamente en todo momento de 1.5K, como se ha diseñado el ensayo.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

3.3.4. Recuperación

Durante la fase de recuperación, se ha parado de introducir calor, dejando el agua sin circular, como en el primer paso, y se han seguido registrando datos de temperatura en las sondas.

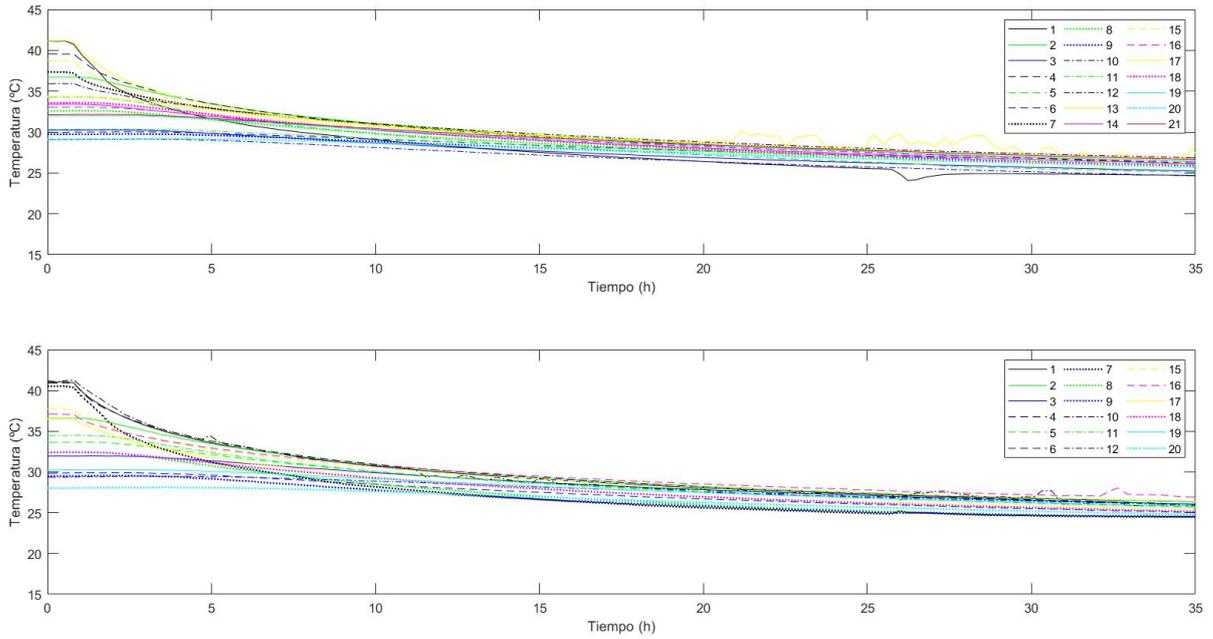


Figura 20: Gráfica de la evolución de la temperatura en las sondas en el período de recuperación.

Como se puede observar en ambas se ha reducido rápidamente la temperatura, y con unos valores similares, todas las sondas se encuentran entre 35 y 30°C prácticamente, y la tendencia de la temperatura es a disminuir.

Como en el caso 1 se ha representado una gráfica con la temperatura media en el intercambiador obtenida a partir de los datos registrados.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

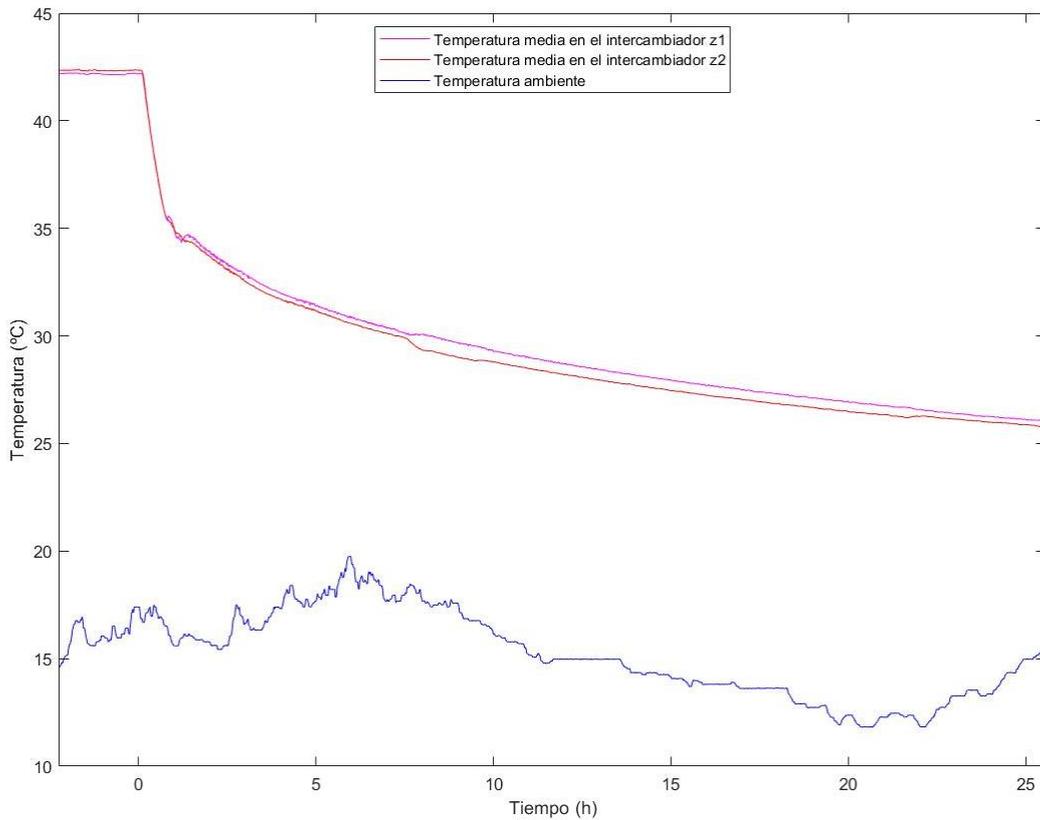


Figura 21: Gráfica de la evolución de las temperaturas de entrada y de salida de las zanjas durante la recuperación.

En la figura anterior se aprecia que la temperatura en la instalación de la zanja 1 y la de la zanja 2 es bastante similar. Se puede ver que para el intervalo que se encuentra alrededor de 28.8°C, que es la temperatura de fusión del PCM, se da un pendiente diferente a la que se estaba dando que es más pronunciada debido a la solidificación del PCM que se había fundido en la inserción de calor, y que, por lo tanto, está absorbiendo parte del calor en vez de solamente disiparlo consiguiendo así temperaturas inferiores. Además, coincide con el aumento de la temperatura ambiente y así se ve en la zanja 1, en la que aumenta su temperatura, creando una mayor diferencia entre la temperatura de ambas. La temperatura ambiente durante este período no tiene grandes variaciones por lo que no se ven oscilaciones.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Visualización de la Evolución Térmica

En primer lugar, continuando con el Matlab y trabajando ahora únicamente con los datos registrados por las sondas, se va a representar la evolución térmica en el interior de las zanjas, para tener una visión más realista de los ensayos. Para que la interpolación que se va a realizar en este apartado tenga un resultado más adecuado se ha añadido a los datos de las medidas, 27 puntos a temperatura de 15.4°C, que es la temperatura sin perturbar del suelo que se ha obtenido en el registro de datos del Testsite en el periodo previo a la inserción de calor, en X igual a 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400, en Y igual a 1m y en Z igual a 0, 18 y 35 cm, para todos los tiempos.

Seguidamente, se ha realizado una interpolación en el tiempo y en el espacio para todos los datos. Para llevarlo a cabo se ha utilizado un complemento que ofrece el programa desarrollado por un usuario, (Chirokov, 2006), en el que están implementadas las funciones de base radial, estas funciones ofrecen una interpolación precisa y en cualquier dimensión, que es la mayor ventaja respecto las funciones de interpolación que incluye Matlab, que, en el caso de datos dispersos, y no cuadrículados como en el caso anterior, se limitan a 3 dimensiones, 'scatteredInterpolant', y en este caso era necesario interpolar en 4 dimensiones, en el tiempo y en las tres dimensiones espaciales, Y, X y Z. Sin embargo, este tipo de interpolaciones se vuelven complejas para un gran número de datos, por lo que en este caso en el que se tienen muchos registros se ha interpolado por partes, en grupos de 5000 datos, para que la interpolación continuase siendo adecuada aún con la división de los datos para cada grupo se cogían 1000 datos del grupo anterior y así se aseguraba la continuidad, gracias a esto se ha conseguido interpolar todos los valores del intervalo considerado para las dos zanjas en aproximadamente una hora. El complemento ofrece los tipos más comunes de funciones de base radial que son la multicuadrática, la gaussiana, la lineal, la de spline cúbico y la de spline de placa delgada, tras probar todas la que mejor muestra la distribución y lo que realmente ocurre en la zanja es la lineal, que es la establecida por defecto, esto tiene sentido debido a que la transmisión de calor de los paneles hacia el suelo tiene un comportamiento bastante lineal.

La interpolación se ha realizado para el período de inserción de calor y parte de la recuperación, de 115 horas a 250 horas del período total de registro de los datos. Las vistas que se utilizan para las dos zanjas son: En primer lugar, se ha utilizado un gráfico de contorno para representar la variación de temperatura desde el intercambiador, 0 en el eje Y, hasta una distancia de 1m para toda la longitud del intercambiador, de 0 a 4m, realizando un corte en el plano Z=18cm, que es la mitad del intercambiador. La segunda figura representada es también un contorno, en el que se representa la variación de temperatura en todo el intercambiador, es decir se ha hecho un corte en Y=0, y se tiene la longitud y altura del intercambiador. Por último, debido a que en los contornos solo

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

es posible representar 3 dimensiones, 2 espaciales y el tiempo, en la tercera vista se han representado las 4 dimensiones que se tiene mediante planos, 3 en Z, para 0, 18 y 35, 8 en X, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400, y ninguno en Y.

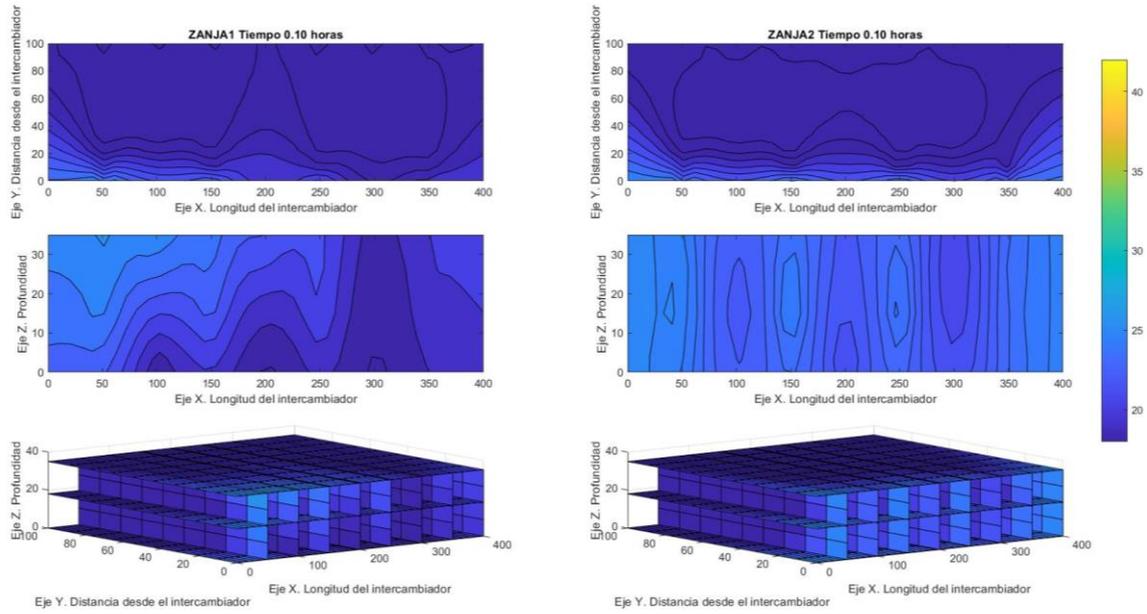


Figura 22: Distribución de las temperaturas para las 0.1 horas del período considerado.

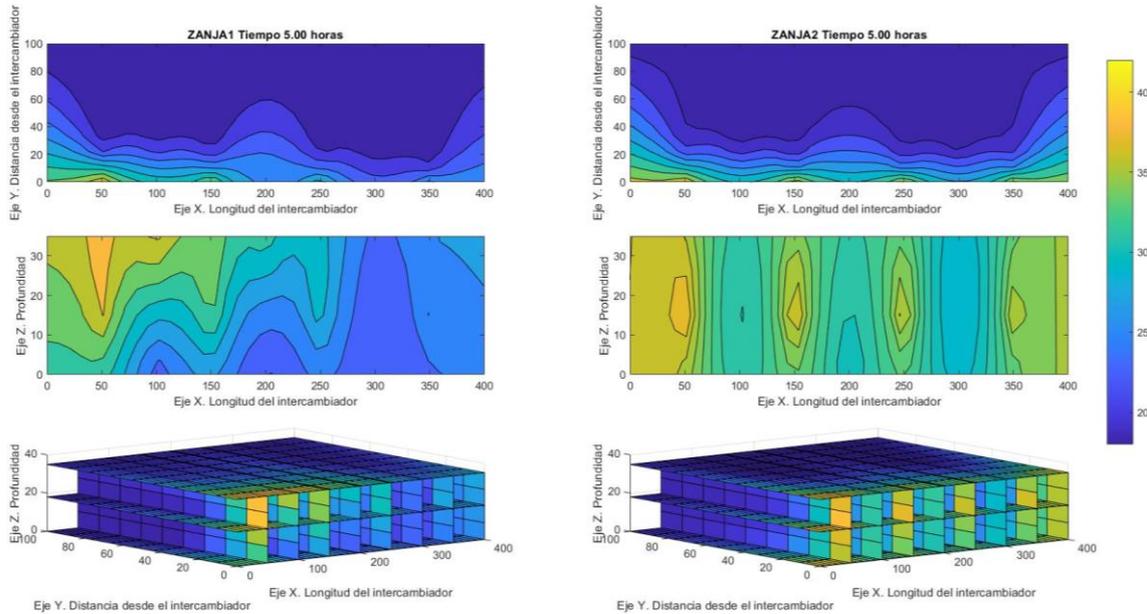


Figura 23: Distribución de las temperaturas para las 5 horas del período considerado.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

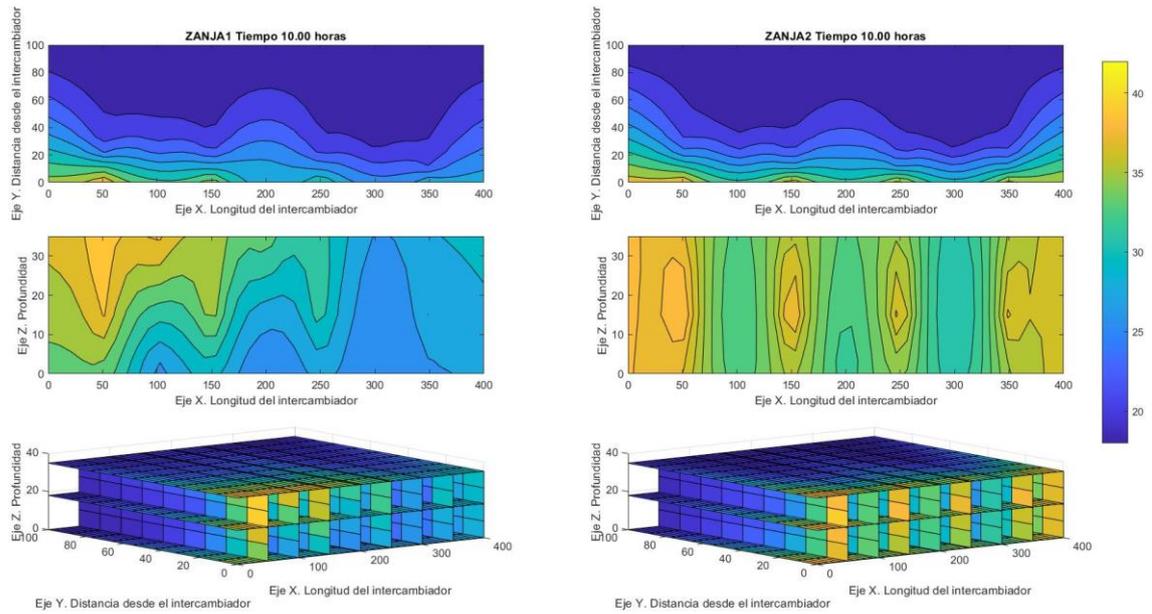


Figura 24: Distribución de las temperaturas para las 10 horas del período considerado.

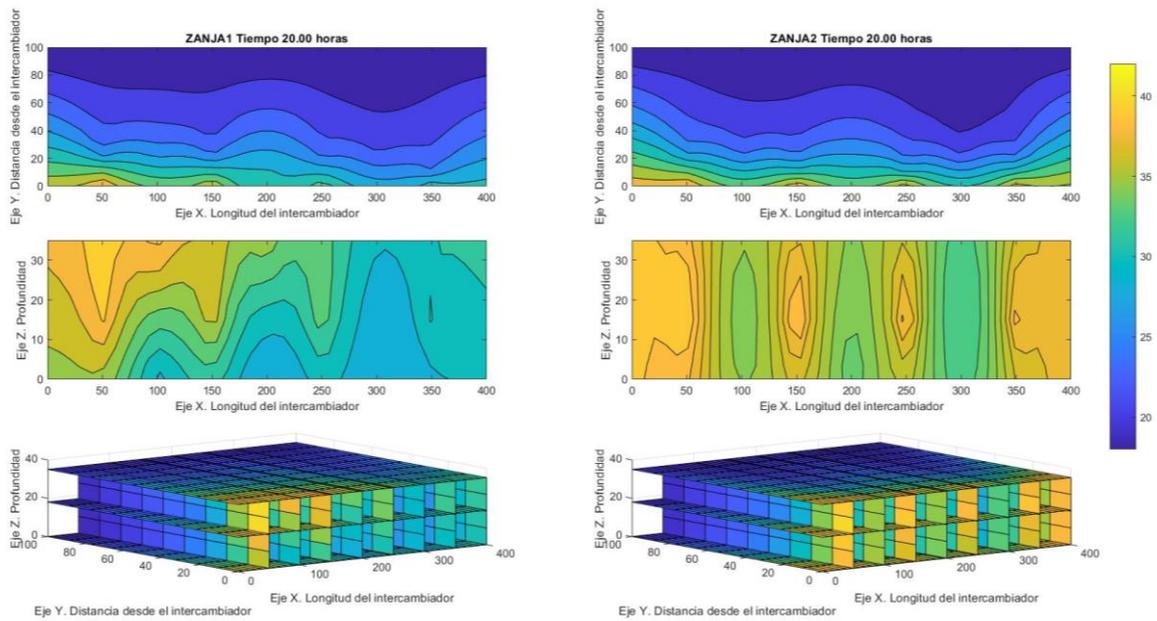


Figura 25: Distribución de las temperaturas para las 20 horas del período considerado.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

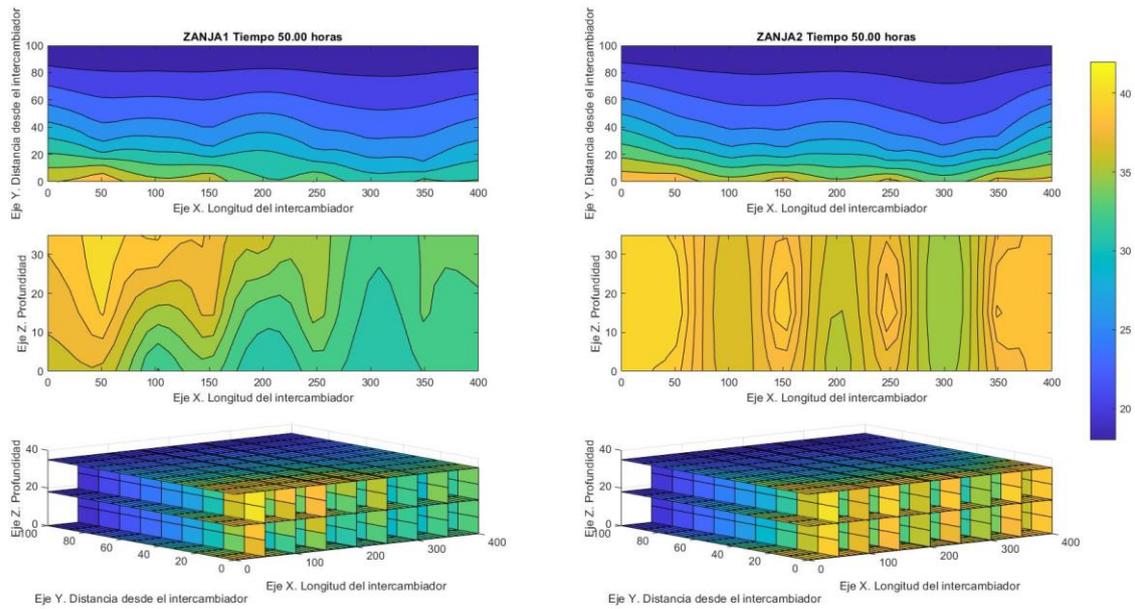


Figura 26: Distribución de las temperaturas para las 50 horas del período considerado.

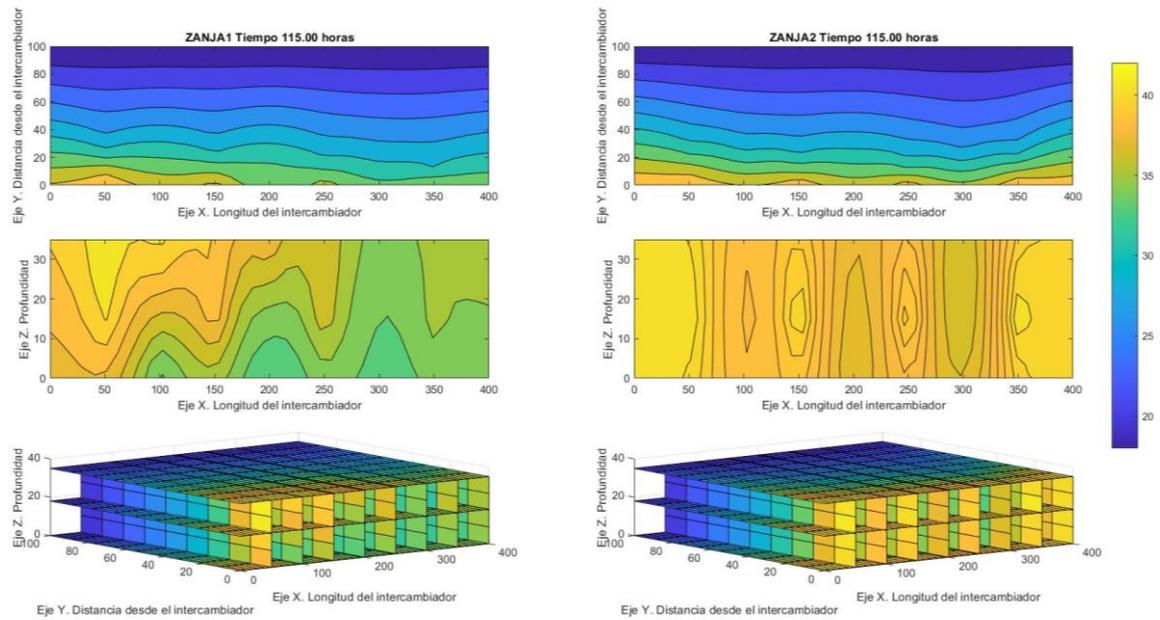


Figura 27: Distribución de las temperaturas para las 115 horas del período considerado.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

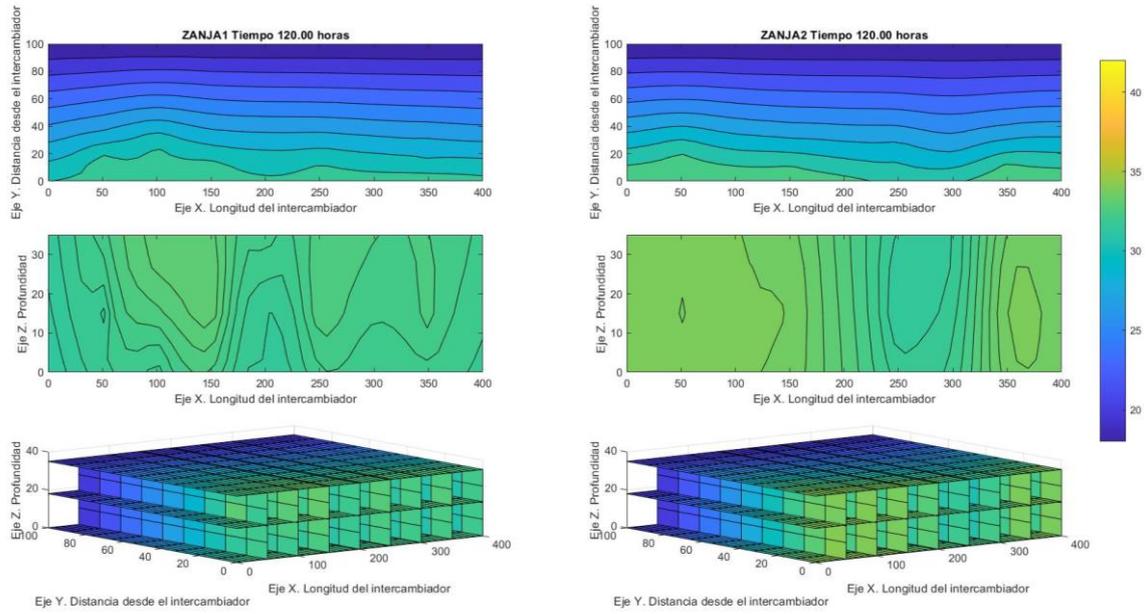


Figura 28: Distribución de las temperaturas para las 120 horas del período considerado.

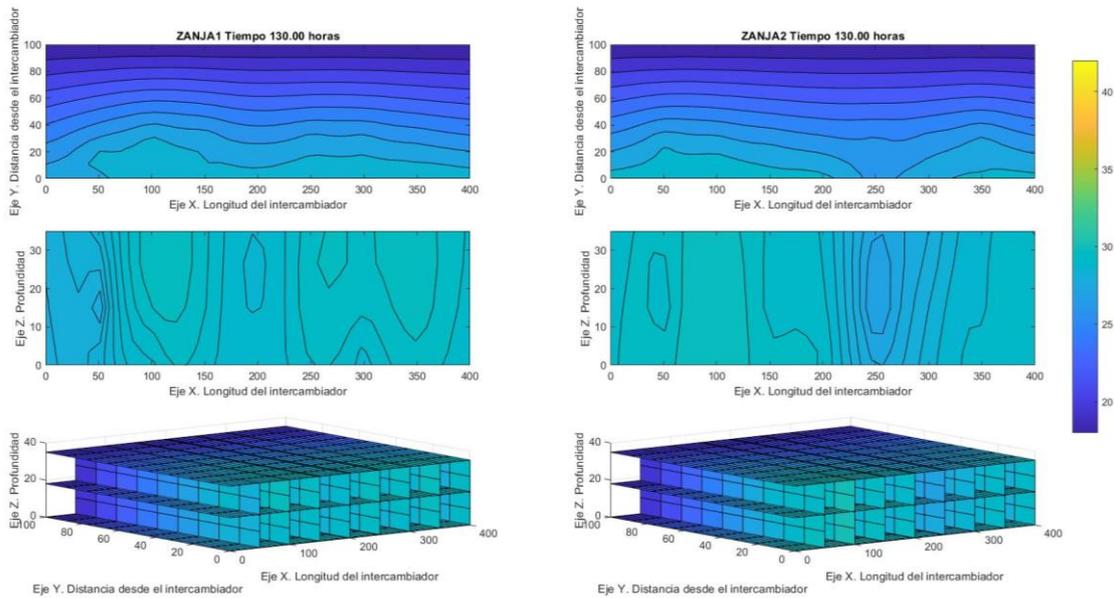


Figura 29: Distribución de las temperaturas para las 130 horas del período considerado.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

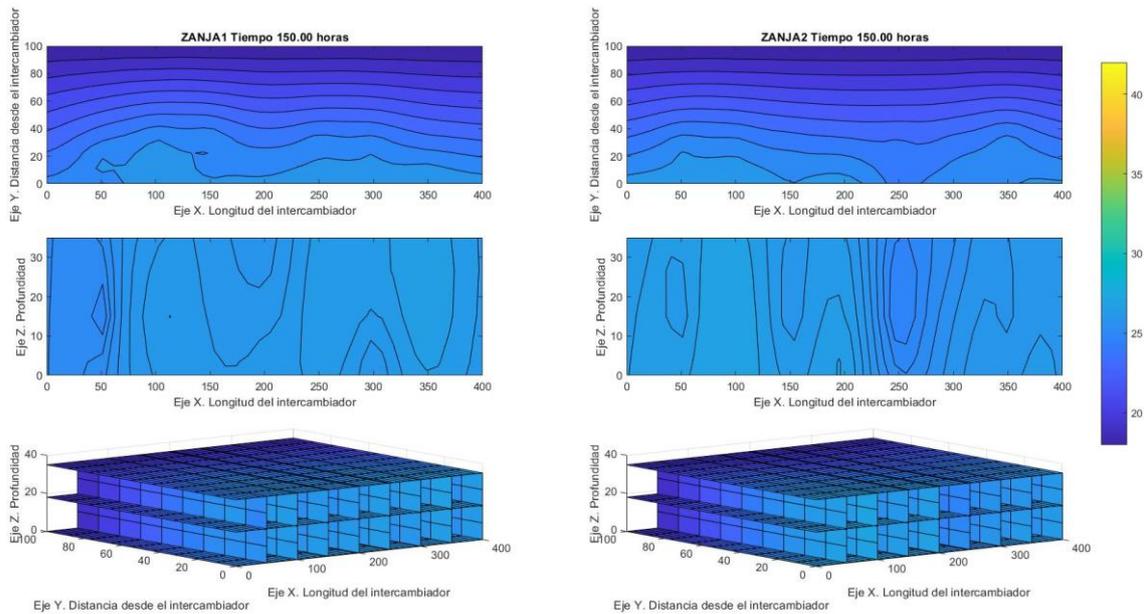


Figura 30: Distribución de las temperaturas para las 150 horas del período considerado.

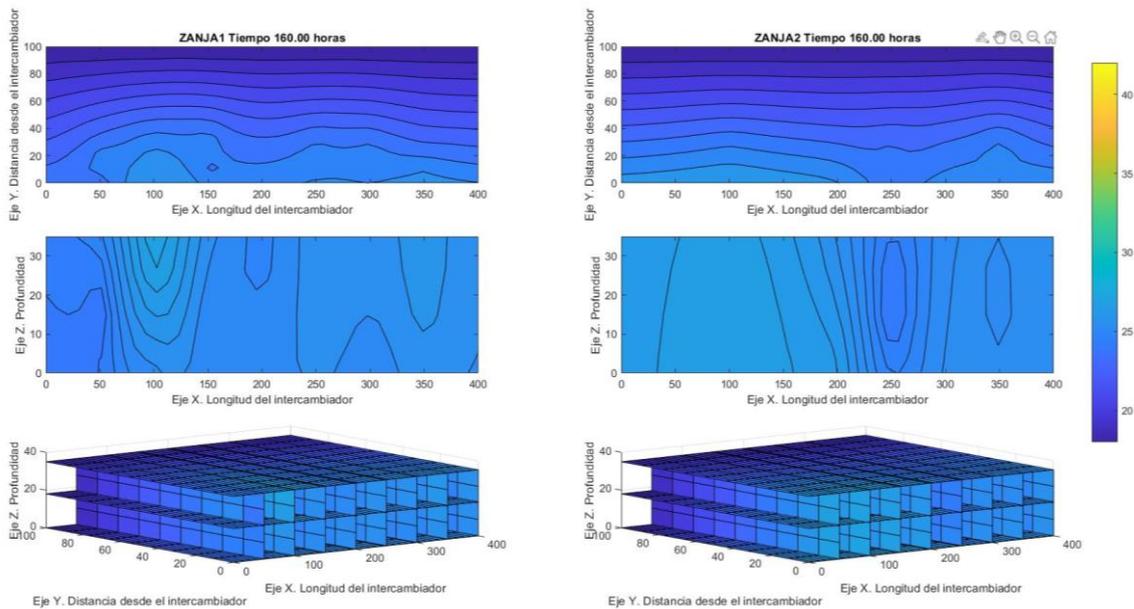


Figura 31: Distribución de las temperaturas para las 160 horas del período considerado.

En el conjunto de figuras anteriores se puede visualizar la evolución térmica que sucede en el interior de las zanjas y suelo circundante. Como se ha dicho en el apartado anterior, en los resultados, en la parte de inyección de calor, la zanja 1 presentaba un registro de las sondas de temperaturas inferiores que la zanja 2 y por ello, se ve en el segundo contorno, que representa la superficie del intercambiador, que en la entrada las dos tienen el mismo color amarillo fuerte de una temperatura de alrededor de 40°C. Sin

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

embargo, en la evolución de la longitud del intercambiador la zanja 1 se vuelve de un color verde por las menores temperaturas mientras que la zanja 2 en toda la longitud tiene un color amarillento-naranjado debido al registro de temperaturas más elevadas, esto como se ha dicho se debe a la que las sondas de la zanja 2 tienen un registro de datos más adecuado.

Por otro lado, en el contorno 1, durante la inserción de calor, se puede observar, que la zanja 2 tiene mayor temperatura que la zanja 1 para la misma distancia desde el intercambiador. Los datos de los que se tiene registro a 13cm y 26cm desde el intercambiador que es en 50, 150, 250 y 350, y en el caso de 26cm también para 100 y 300 en el eje X, mirando los contornos se tiene que están a una temperatura parecida en todo el conjunto de intercambiadores para las dos zanjas, salvo, tal vez, en el principio y final. Lo que realmente cambia es el inicio de las franjas de colores de temperatura, que se debe a la interpolación lineal debido al registro de mayores temperaturas sobre los captadores de la zanja 2, así que el principal motivo de que se observe una mayor temperatura en esta zanja es debido a esto. Otro motivo, con una menor importancia, es debido que se ha pasado de una temperatura inferior a la temperatura de fusión del PCM a una superior parte de este, o su totalidad, se ha fundido liberando un calor de forma que se han dado unas temperaturas mayores.

En el período de parada de la inserción de calor, a partir de la figura de 115 horas, se puede ver en el contorno 1, que en la zanja 2 se alcanza temperaturas inferiores que en la zanja 1, se debe a que se llega a la temperatura de fusión del PCM y la parte de este que se había fundido se solidifica haciendo que se absorba más calor que la zanja 1 disipa presentando, por tanto, temperaturas inferiores.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

4.2. Rendimiento Térmico a partir de Modelos de Temperatura Constante

Este apartado tiene como finalidad obtener la eficiencia del intercambiador, también conocida como resistencia térmica del pozo, R_b , a partir de los datos registrados durante la inyección de calor. Para ello se ha utilizado Excel y Matlab. En primer lugar, se ha hecho una gráfica de la temperatura de entrada frente la de salida del intercambiador horizontal junto con la potencia inyectada durante el período de inyección de calor en cada una de las dos zanjas.

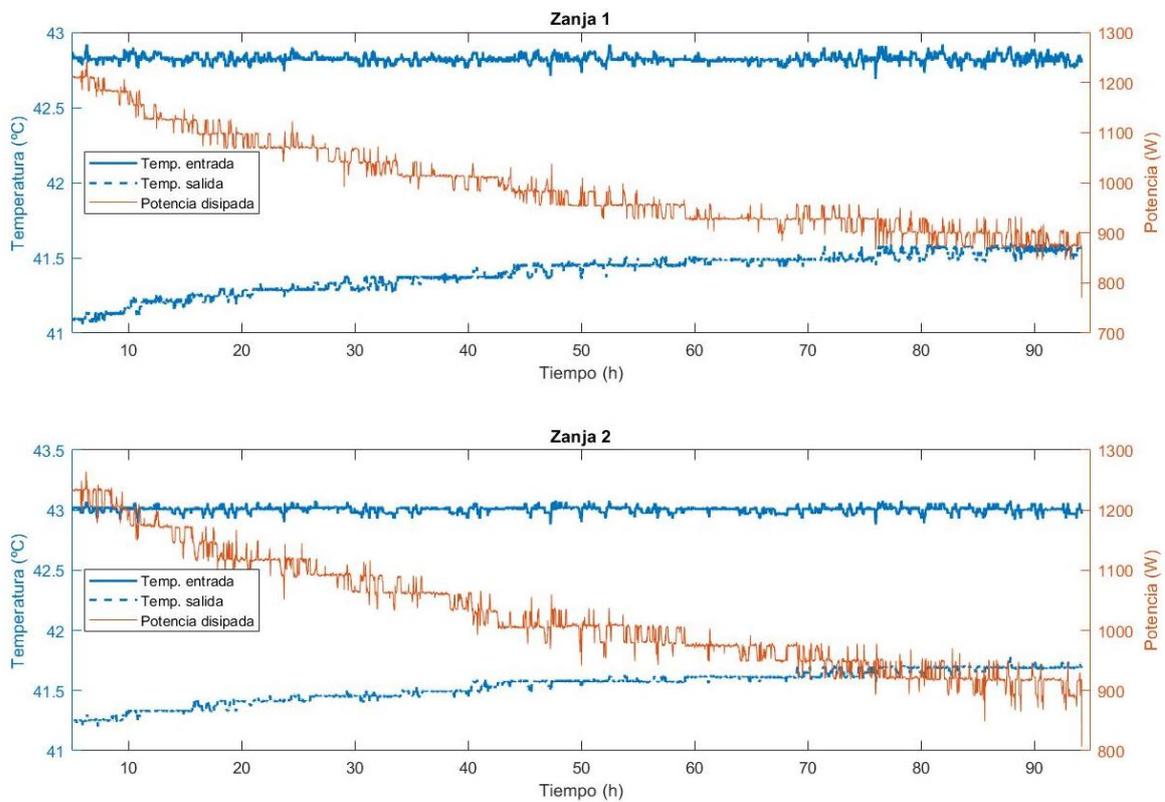


Figura 32: Gráficas de la potencia disipada frente la temperatura de entrada y de salida

En esta se observa que en ambas hacia el final del período la temperatura de salida se vuelve estable. En el caso de la zanja 1 toma un valor de 41.55°C y en la zanja 2 de 41.7°C. La temperatura de entrada que es constante es de 42.8°C en la zanja 1 y de 43°C en la zanja 2. Al ser un ensayo térmico a temperatura constante, para obtener el parámetro deseado se ha adaptado el ensayo a estudios previos de TRTs a temperatura constante, (Jia, Lee, & Cheng, 2019), ya que estos análisis se basaban en instalaciones verticales. Primero, se han obtenido a partir de la diferencia de la temperatura de entrada y la temperatura de salida en el periodo estable, el valor de q , [W/m], a partir de:

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

$$q = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T}{L} \quad (1)$$

En la que \dot{m} es el caudal másico circulando por el intercambiador, C_p es el calor específico del agua, ΔT es la variación entre la temperatura de entrada y de salida y L es la longitud del intercambiador.

El caudal másico como se había dicho es de 5 l/min, hay pequeñas variaciones de centésimas por la precisión del regulador, pero son despreciables. Al tratarse de agua con el peso específico, 1000 kg/l, se ha pasado de volumen a masa. En cuanto al calor específico se ha tomado el valor 4.186 KJ/Kg·K.

Los valores de ΔT son de 1.25°C para la zanja 1 y de 1.3°C para la zanja 2, obteniendo un valor de q de 109.0104 W/m para la zanja 1 y 129.2428 W/m para la zanja 2.

Siguiendo el documento anteriormente citado, se han extraído de este las siguientes ecuaciones:

$$g(t^*, \beta) = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\mu z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\operatorname{erfc}(\mu z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - D_B \quad (2)$$

$$D_A = \frac{\sqrt{\beta^2 + 1} \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 1}) - \beta \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \beta)}{\beta \cdot \sqrt{\pi}} \quad (3)$$

$$D_B = \frac{\sqrt{\beta^2 + 1} \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 1}) - 0.5 \cdot \left(\beta \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} \cdot \operatorname{erfc}(\gamma \cdot \sqrt{\beta^2 + 4}) \right)}{\beta \cdot \sqrt{\pi}} \quad (4)$$

Donde t^* es el tiempo adimensional, $\frac{9 \cdot \alpha_s \cdot t}{H^2}$, β es el radio de la zanja adimensional, $\frac{r_b}{H}$, μ es $\frac{3}{2} \cdot \sqrt{t^*}$, z es la coordenada axial, γ es la constante de Euler y erfc es la función de error complementaria.

En este caso al tratarse de una instalación horizontal y con un intercambiador que no es de tubos, se ha de adaptar la geometría a la zanja. El parámetro r_b es el radio del pozo y H la altura del pozo, en este caso el pozo sería la parte de la zanja que contiene el material de relleno y se puede ver en la Figura 33: Geometría de la parte de la zanja que contiene material de relleno, por lo que la H , que es la profundidad del

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

pozo, debería ser de 0.4 m acorde con la representación. Sin embargo, se ha tomado el valor de la longitud, 4m, para que se ajuste mejor al modelo debido a que tiene que ser el parámetro con mayor valor siguiendo lo que sucedería en una instalación vertical. Se ha utilizado así para obtener el tiempo adimensional t^* , junto con α_s que es la difusividad térmica que tiene un valor de $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y t que es el instante de tiempo en segundos. β se ha obtenido mediante la división de la profundidad por la longitud, obteniendo un valor de 0.1.

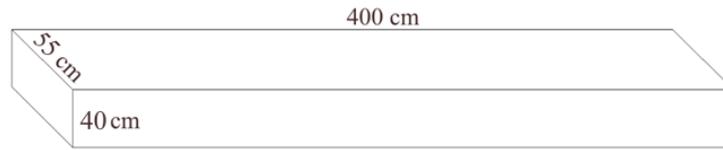


Figura 33: Geometría de la parte de la zanja que contiene material de relleno.

Con todos los valores ya definidos se ha obtenido la función $g(t^*, \beta)$ para todos los instantes de tiempo, con un resultado del promedio de los valores obtenidos con esta para todo el tiempo de 0.56936.

La R_b se obtiene de la ecuación siguiente extraída del mismo artículo:

$$q = \frac{2\pi k_s}{g + 2\pi k_s R_b} \cdot \Delta T_p \quad (5)$$

Donde k_s es la conductividad térmica del terreno, en este caso se ha tomado un valor de 2.37 W/mK, valor obtenido en ensayos térmicos previos realizados en el laboratorio geotérmico de la Universidad Politécnica de Valencia, (Urchueguía, y otros, 2018), y ΔT_p se define como:

$$|\Delta T_p| = \frac{p \cdot (|\Delta T_{in}|^{p+1} - |\Delta T_{out}|^{p+1})}{(1 + p) \cdot (|\Delta T_{in}|^p - |\Delta T_{out}|^p)} \quad (6)$$

En la que ΔT_{in} y ΔT_{out} son los incrementos de la temperatura de entrada y salida, respectivamente, respecto a del terreno sin perturbar y p es un coeficiente para adaptar la función que, para los TRTs, de acuerdo con el documento, da los mejores resultados cuando se toma un valor en torno a -1, así que se ha utilizado -0.99. El valor obtenido para el periodo estable considerado de la zanja 1 es de 26.7650°C y para la zanja 2 de 26.9396°C.

De esta forma ya queda todo definido y se puede obtener R_b mediante la reformulación de la ecuación (5), obteniendo:

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_s} \left(\frac{2\pi k_s \Delta T_p}{q} - g \right) \quad (7)$$

El resultado es que se tiene un valor de R_b de 0.2061 mK/W para la zanja 1 y de 0.1690 mK/W para la zanja 2. Valor similar al obtenido en estudios previos de TRTs de potencia constante, (Beier & Holloway, 2015), en intercambiadores geotérmicos horizontales.

5. CONCLUSIONES

En el presente documento se ha analizado la influencia de utilizar un porcentaje de material de cambio fase en el material de relleno de la zanja de un intercambiador de calor geotérmico horizontal, detallando el proceso de instalación, el sistema de adquisición de datos, el diseño de protocolo de ensayos térmicos para evaluar la eficiencia térmica y el análisis de dichos ensayos.

Se ha obtenido una resistencia térmica para la zanja sin PCM de 0.2061 mK/W mientras que para la que sí que contiene de 0.1690 mK/W. Aunque con las gráficas no se veía una gran diferencia en la variación de la potencia disipada los resultados numéricos demuestran que la presencia de PCM en el material de relleno tiene un efecto positivo.

Por otro lado, se ha visto en las gráficas representadas que, tras la inyección de calor, durante la recuperación térmica, la zanja con PCM tenía una mayor reducción de la temperatura y por tanto una mejor recuperación que la otra zanja. Esto se ha debido a que parte del material de cambio de fase que se había fundido se ha solidificado debido a la reducción de temperatura a la que se ha visto sometido absorbiendo más calor del que disipa la otra zanja. Dicha variación ha sido de alrededor de 0.6°C.

Por lo tanto, el uso de PCM presenta ciertas ventajas; se tiene una resistencia térmica del intercambiador inferior, y, por lo tanto, mayor rendimiento térmico; y en la recuperación se observa una mayor reducción de la temperatura para el mismo periodo de tiempo.

6. REFERENCIAS

- Parlamento europeo. (2013, 1 de marzo). *Decisión por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías*. (Vol. L 62/27). Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2013/062/L00027-00035.pdf>
- Parlamento Europeo. (2018, 11 de diciembre). *Directiva (UE) 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables* (Vol. L 328/82). Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>
- Lee, K. C. (2001). Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30(4), 431-442. doi:10.1016/S0375-6505(00)00056-0
- Eslami-nejad, P., & Bernier, M. (2013). A Preliminary Assessment on the Use of Phase Change Materials Around Geothermal Boreholes. *ASHRAE Transactions*, 119(2), 312-321. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/268095015_A_Preliminary_Assessment_on_the_Use_of_Phase_Change_Materials_Around_Geothermal_Boreholes_DE-13-028
- Bottarelli, M., Bortoloni, M., Su, Y., Yousif, C., Aydın, A. A., & Georgiev, A. (2014). Numerical analysis of a novel ground heat exchanger coupled with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 88, 369-375. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.016
- Bottarelli, M., Bortoloni, M., & Su, Y. (2015). Heat transfer analysis of underground thermal energy storage in shallow trenches filled with encapsulated phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1044-1051. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.002
- Qi, D., Pu, L., Sun, F., & Li, Y. (2016). Numerical investigation on thermal performance of ground heat exchangers using phase change materials as grout for ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 106, 1023-1032. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.06.048
- Yang, W., Xu, R., Yang, B., & Yang, J. (2019). Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfill. *Energy*, 174, 216-235. doi:10.1016/j.energy.2019.02.172
- Chirokov, A. (2006). Scattered Data Interpolation and Approximation using Radial Base Functions. MATLAB Central File Exchange. Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10056-scattered-data-interpolation-and-approximation-using-radial-base-functions>
- Yang, W., Xu, R., Yang, B., & Yang, J. (2019). Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfill. *Energy*, 174, 216-235. doi:10.1016/j.energy.2019.02.172
- Jia, J., Lee, W., & Cheng, Y. (2019). Field demonstration of a first constant-temperature thermal response test. *Applied Energy*, 249, 79-86. doi:10.1016/j.apenergy.2019.04.145

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Urchueguía, J. F., Lemus-Zúñiga, L.-G., Oliver-Villanueva, J.-V., Badenes, B., Mateo Pla, M. A., & Cuevas, J. M. (2018). How Reliable Are Standard Thermal Response Tests? An Assessment Based on Long-Term Thermal Response. *Energies*, *11*, 3347.
doi:10.3390/en1123347

Beier, R. A., & Holloway, W. A. (2015). Changes in the thermal performance of horizontal boreholes with time. *Applied Thermal Engineering*, *78*, 1-8.
doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.12.041

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

1.	MANO DE OBRA	56
2.	MATERIALES	57
2.1.	Sistema de Captación	57
2.2.	Relleno de la Zanja	59
2.3.	Registro de Datos	60
3.	MAQUINARIA	61
4.	TOTAL	62

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

1. MANO DE OBRA

Nº	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1.1	h	Oficial 1ª calefactor o fontanero	7.00	19.42	135.94
1.2	h	Ayudante calefactor o fontanero	7.00	17.86	125.02
1.3	h	Peón ordinario construcción	3.00	15.92	47.76
1.4	h	Oficial 1ª instalador de telecomunicaciones	11.00	19.56	215.16
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 1					523.88

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

2. MATERIALES

2.1. Sistema de Captación

Nº	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
2.1.1	Ud.	Captador geotérmico compacto 'GeoFlow' de polipropileno de GREENHEISS.	8.00	512.96	4103.68
2.1.2	Ud.	Material auxiliar para montaje y sujeción a la obra de las tuberías de polietileno resistente a la temperatura (PE-RT), de 32 mm de diámetro exterior.	10.00	0.14	1.40
2.1.3	m	Tubo de polietileno resistente a la temperatura (PE-RT), serie 5, de 32 mm de diámetro exterior y 2,9 mm de espesor, según UNE-EN ISO 22391-2, con el precio incrementado el 30% en concepto de accesorios y piezas especiales.	25.30	3.66	92.60
2.1.4	Ud.	Válvula mezcladora termostática de 3 vías, de 1/2", con ajuste de la salida de agua entre 30°C y 65°C.	1.00	48.00	48.00
2.1.5	Ud.	Electrobomba centrífuga, de hierro fundido, de tres velocidades, con una potencia de 0,071 kW, impulsor de tecnopolímero, eje motor de acero cromado, bocas roscadas macho de 1", aislamiento clase H, para alimentación monofásica a 230 V.	1.00	147.44	147.44
2.1.6	m ²	Panel semirrígido de lana de roca, Acustilaine MD "ISOVER", según UNE-	12	12.6	151.2

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

EN 13162, no revestido, de
120 mm de espesor,
resistencia térmica 3,4
 $\text{m}^2\text{K/W}$, conductividad
térmica 0,035 $\text{W}/(\text{mK})$.

TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 2.1

4544.32

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

2.2. Relleno de la Zanja

Nº	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
2.2.1	kg	Cemento Portland CEM I 42,5 N, en sacos, según UNE-EN 197-1.	487.50	0.11	53.63
2.2.2	t	Arena de 0 a 5 mm de diámetro, para relleno de zanjas.	1.82	8.95	16.29
2.2.4	kg	Material microencapsulado de cambio de fase 'CrodaTherm™ ME29P' de CRODA.	75.00	12.48	936
2.2.6	kg	Aditivo plastificante-aireante para morteros.	2.60	1.16	3.02
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 2.2					1008.94

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

2.3.Registro de Datos

Nº	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
2.3.1	Ud.	Sensor de temperatura STS3x	42.00	2.51	105.42
2.3.2	m	Cable bus compuesto de 2 hilos trenzados de 0,5 mm ² de sección.	250.00	0.80	200.00
2.3.4	Ud.	Multiplexor pasivo de 1 entrada y 8 salidas, con conectores hembra tipo RJ-45 de 8 contactos, categoría 6, color blanco.	6.00	23.00	138.00
2.3.5	Ud.	Bus I ² C	6.00	7.90	47.40
2.3.6	Ud.	HUB USB 3.0 de 4 puertos de alta velocidad	2.00	6.50	13.00
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N° 2.3					503.82

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

3. MAQUINARIA

Nº	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
3.1	h	Retroexcavadora hidráulica sobre neumáticos, de 115 kW.	0.66	48.54	32.04
3.2	h	Hormigonera	1.50	1.68	2.52
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL N°3					34.56

**Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales
Planos con Diferentes Tipos de Relleno.**

4. TOTAL

Mano de obra 523.8 €

Materiales

Sistema de captación 4544.32 €

Relleno de la zanja 1008.94 €

Registro de datos 503.82 €

Maquinaria 34.56 €

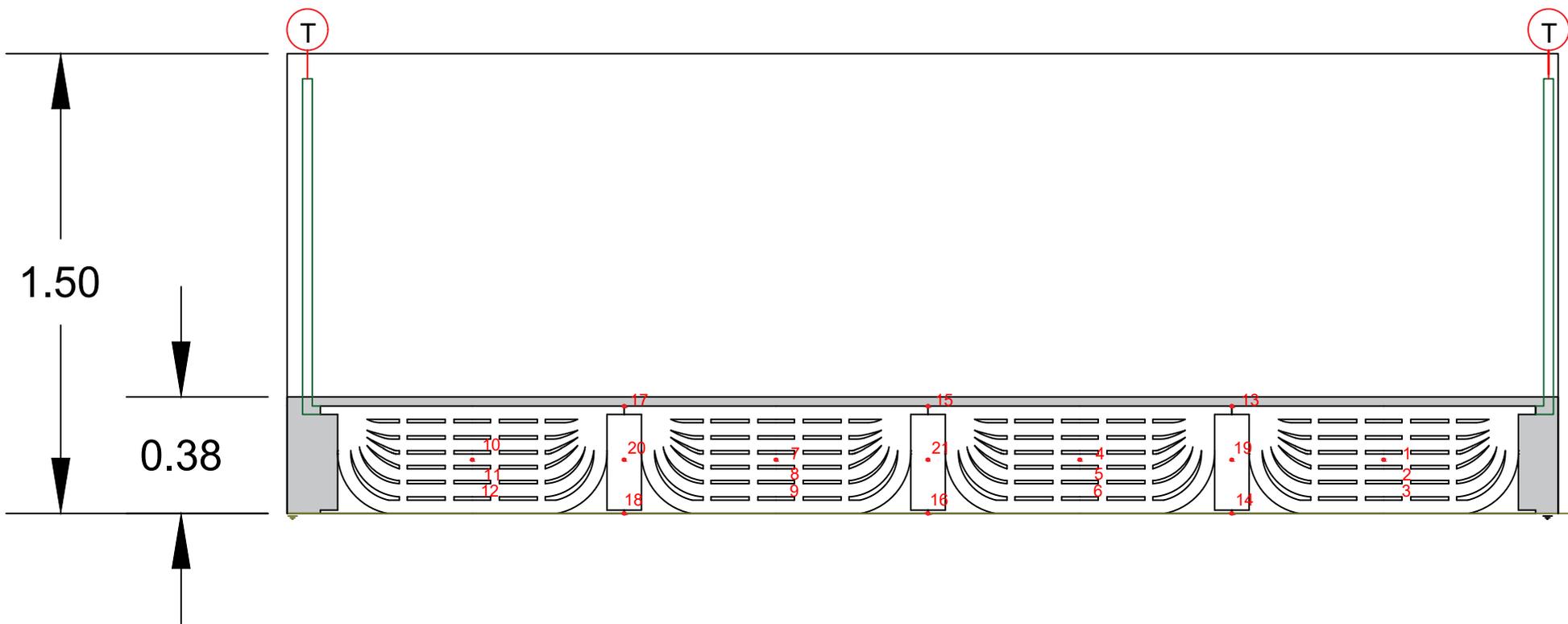
TOTAL 6615.44 €

DOCUMENTO 3: PLANOS

Plano 1. Configuración de los sensores. Alzado.

Plano 2. Configuración de los sensores. Planta.

Plano 3. Conexiones hidráulicas en planta.



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Proyecto: **PROYECTO ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA
TÉRMICA DE INTERCAMBIADORES
GEOTÉRMICOS PLANOS CON DIFERENTES
TIPOS DE RELLENO**

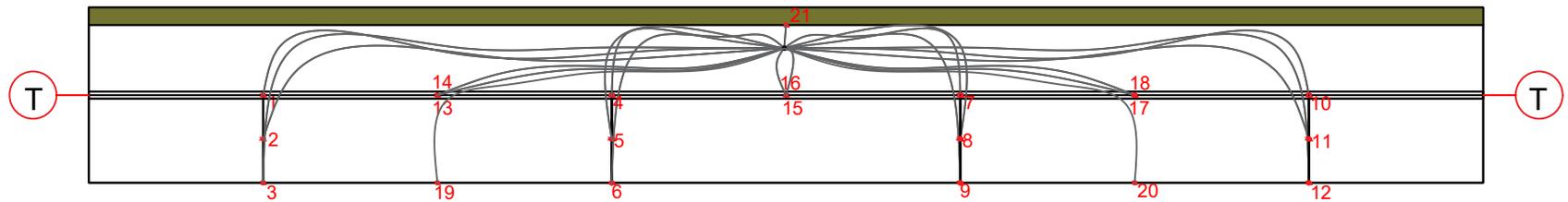
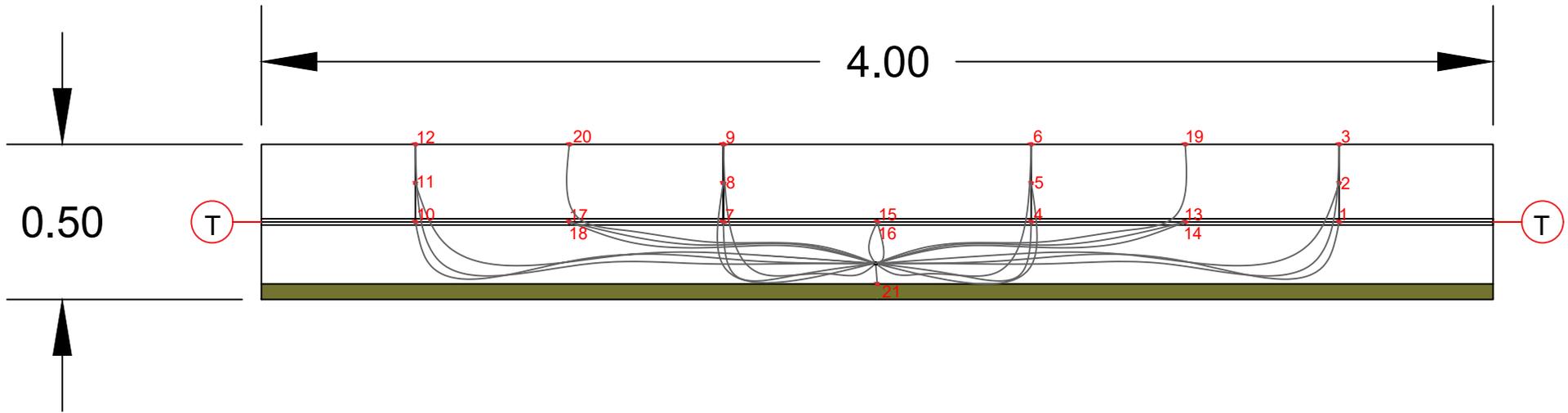
Fecha: **Junio 2021**

Escala: **1/20**

Plano: **Configuración de los sensores.
Alzado.**

Nº Plano: **1**

Carmen María Miñana García
Autor proyecto



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Proyecto:

PROYECTO ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA
TÉRMICA DE INTERCAMBIADORES
GEOTÉRMICOS PLANOS CON DIFERENTES
TIPOS DE RELLENO

Fecha:

Junio 2021

Escala:

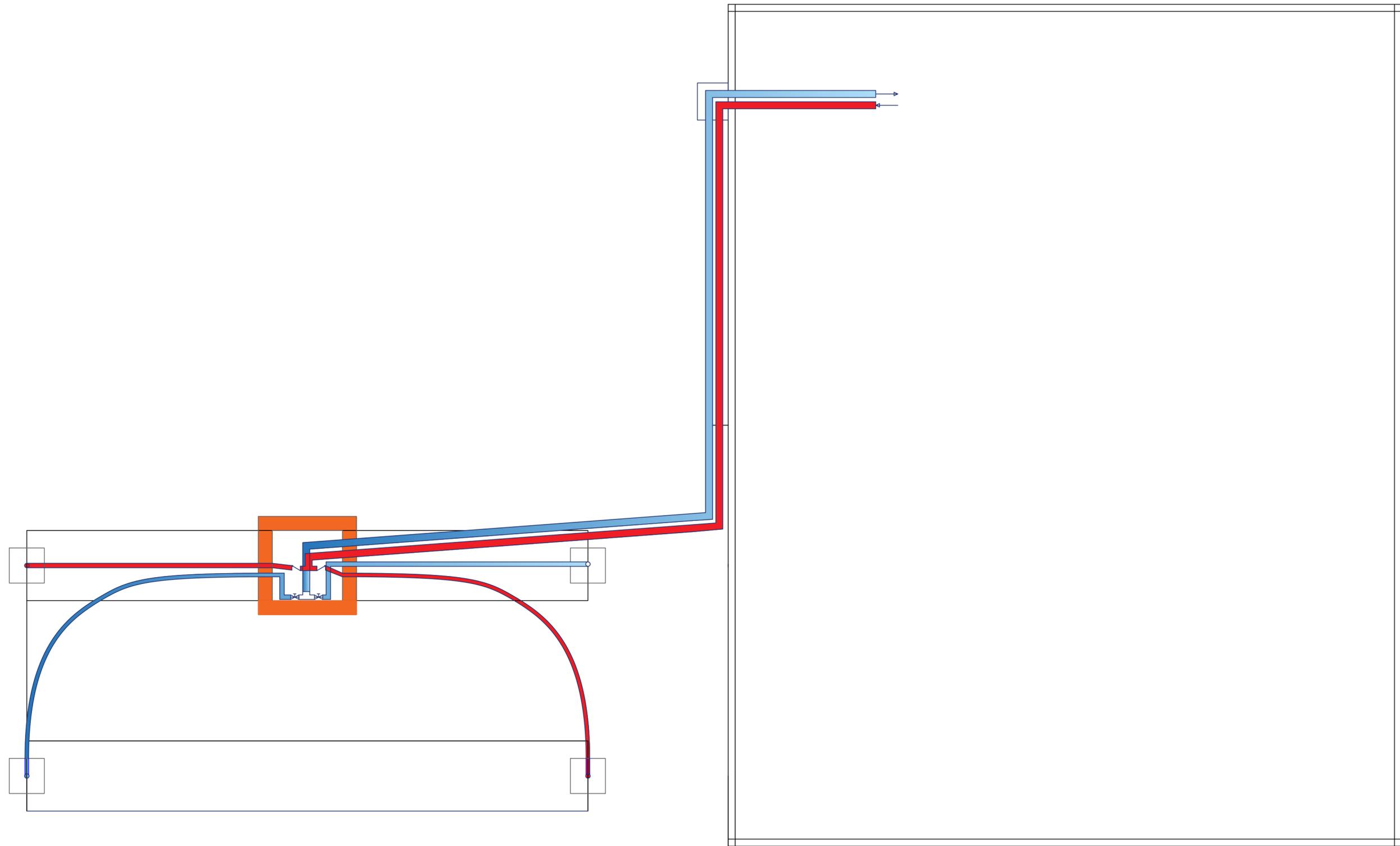
1/20

Plano:

Configuración de los sensores.
Planta.

Nº Plano:

Carmen María Miñana García
Autor proyecto



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES		Proyecto:
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALÈNCIA	PROYECTO ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS PLANOS CON DIFERENTES TIPOS DE RELLENO
Fecha:	Junio 2021	Escala: 1/20
Plano:	Conexiones hidráulicas en planta.	Nº Plano: 3
Carmen María Miñana García <small>Autor proyecto</small>		

DOCUMENTO 4: ANEXOS

Anexo 1. Código de Matlab.

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

Anexo 1. Código de Matlab.

```
%% Cargar datos

datos=readtable('test2.csv','Delimiter',' ');
datos.Var2=datetime(datos.Var2,'ConvertFrom','posixtime');
datos2=xlsread('2021_CTE_todo.xlsx');

%% Definir el identificador de los datos y coordenadas
de las sondas

q=cell2mat(datos{:,1});
idx_h1= strncmpi(q,"H1",2);
idx_h2= strncmpi(q,"H2",2);
idx_h3= strncmpi(q,"H3",2);
idx_m1= strncmpi(q,"m1",2);
idx_m2= strncmpi(q,"m2",2);
idx_m3= strncmpi(q,"m3",2);
indiceArduino=idx_m1+idx_m2*2+idx_m3*3+idx_h1*4+idx_h2
*5+idx_h3*6;
Xsens=[ 50, 50,
50,150,150,150,250,250,250,350,350,350,100,100,200,200
, ...
300,300,100,300, 200, nan];
Ysens=[ 0, 13, 26, 0, 13, 26, 0, 13, 26, 0, 13,
26, 0, 0, 0, 0, ...
0, 0, 26, 26, -26, nan];
Zsens=[ 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 18,
18, 35, 0, 35, 0, ...
35, 0, 18, 18, 18, nan];

%% Conexión de los sensores

% fila : Es el conjunto de sensores
% columna : El punto de conexión del sensor en el
sistema de adquisición de
% datos
% indices_sensores(fila,columna): Indice de la
coordenada física donde
% está el sensor

indices_sensores=[...
7,8,9,22,10,11,12,1;...
2,3,4,22,5,6,17,18;...
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
    15,16,13,22,21,19,20,14; ...
    6,3,8,4,13,22,11,16; ...
    5,1,19,2,14,7,22,12; ...
    22,15,17,10,21,20,9,18 ...
];

%% Separación de los datos

x_measured=zeros(length(indiceArduino)*8,1);
y_measured=x_measured;
z_measured=x_measured;
t_measured=x_measured;
zanja=x_measured;
id_sensor=x_measured;
j=1;
for i=1:length(indiceArduino)

x_measured(j:j+7)=Xsens(indices_sensores(indiceArduino
(i),:));

y_measured(j:j+7)=Ysens(indices_sensores(indiceArduino
(i),:));

z_measured(j:j+7)=Zsens(indices_sensores(indiceArduino
(i),:));
    t_measured(j:j+7)=hours(datos.Var2(i)-
datos.Var2(1));
    zanja(j:j+7)=indiceArduino(i)>3;

id_sensor(j:j+7)=indices_sensores(indiceArduino(i),:);
    j=j+8;
end
Temp_measured=reshape(datos{: , 3:end}', [], 1);

T22=zeros(14513,1);
T23=T22;
T32=T22;
T33=T22;
W2=T22;
W3=T22;
Ta=T22;
tiempo_measured=T22;

for i=1:14513
    W2(i)=datos2(i, 5);
    W3(i)=datos2(i, 6);
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
T22(i)=datos2(i, 12);
T23(i)=datos2(i, 13);
T32(i)=datos2(i, 16);
T33(i)=datos2(i, 17);
Ta(i)=datos2(i,24);
tiempo_measured(i)=datos2(i,60);
end

%% Quitar los NaN

idx_quitar=isnan(Temp_measured);
Temp_measured(idx_quitar)=[];
x_measured(idx_quitar)=[];
y_measured(idx_quitar)=[];
z_measured(idx_quitar)=[];
t_measured(idx_quitar)=[];
zanja(idx_quitar)=[];
id_sensor(idx_quitar)=[];

%% Separar por zanjas

v1=zanja==1;
cambios=find(diff(v1)~=0)+1;
idx_zanja1=find(v1);
idx_zanja2=find(~v1);

%% Interpolación de la temperatura en el tiempo

%Zanja 1
F1=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==1), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==1));
F2=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==2), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==2));
F3=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==3), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==3));
F4=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==4), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==4));
F5=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==5), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==5));
F6=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==6), ...
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==6));
F7=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==7), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==7));
F8=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==8), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==8));
F9=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==9), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==9));
F10=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==10), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==10));
F11=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==11), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==11));
F12=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==12), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==12));
F13=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==13), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==13));
F14=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==14), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==14));
F15=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==15), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==15));
F16=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==16), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==16));
F17=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==17), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==17));
F18=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==18), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==18));
F19=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==19), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==19));
F20=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==20), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==20));
F21=griddedInterpolant(t_measured(zanja==1 &
id_sensor==21), ...
Temp_measured(zanja==1 & id_sensor==21));
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

% Zanja 2

```
F_1=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==1), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==1));
F_2=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==2), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==2));
F_3=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==3), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==3));
F_4=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==4), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==4));
F_5=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==5), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==5));
F_6=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==6), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==6));
F_7=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==7), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==7));
F_8=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==8), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==8));
F_9=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==9), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==9));
F_10=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==10), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==10));
F_11=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==11), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==11));
F_12=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==12), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==12));
F_15=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==15), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==15));
F_16=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==16), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==16));
F_17=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==17), ...
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==17));
F_18=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==18), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==18));
F_19=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==19), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==19));
F_20=griddedInterpolant(t_measured(zanja==0 &
id_sensor==20), ...
Temp_measured(zanja==0 & id_sensor==20));

%% Gráfica de la temperatura en función del tiempo
para cada sonda

figure(1);
subplot(2,1,1);
title('Zanja 1');
plot(t_measured(1:500:end),F1(t_measured(1:500:end)),
'k');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F2(t_measured(1:500:end)),
'g');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F3(t_measured(1:500:end)),
'b');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F4(t_measured(1:500:end)),
'k--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F5(t_measured(1:500:end)),
'g--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F6(t_measured(1:500:end)),
'b--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F7(t_measured(1:500:end)),
'k:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F8(t_measured(1:500:end)),
'g:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F9(t_measured(1:500:end)),
'b:', ...
'LineWidth',1.25);
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F10(t_measured(1:500:end)),
'k-.');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F11(t_measured(1:500:end)),
'g-.');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F12(t_measured(1:500:end)),
'b-.');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F13(t_measured(1:500:end)),
'y');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F14(t_measured(1:500:end)),
'm');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F15(t_measured(1:500:end)),
'y--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F16(t_measured(1:500:end)),
'm--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F17(t_measured(1:500:end)),
'y:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F18(t_measured(1:500:end)),
'm:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F19(t_measured(1:500:end)),
'c');
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F20(t_measured(1:500:end)),
'c:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end), F21(t_measured(1:500:end)),
'r');
hold on
ylim([15 45]);
xlim([0 114]); %inyección
%xlim([115 150]); %recuperación
%xticklabels([0 5 10 15 20 25 30 35]);
legend('1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','
12','13','14', ...
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
'15','16','17','18','19','20','21', 'NumColumns', 3);
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Temperatura (°C)');

subplot(2,1,2);
title('Zanja 2');
plot(t_measured(1:500:end),F_1(t_measured(1:500:end)),
'k');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_2(t_measured(1:500:end)),
'g');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_3(t_measured(1:500:end)),
'b');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_4(t_measured(1:500:end)),
'k--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_5(t_measured(1:500:end)),
'g--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_6(t_measured(1:500:end)),
'b--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_7(t_measured(1:500:end)),
'k:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_8(t_measured(1:500:end)),
'g:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_9(t_measured(1:500:end)),
'b:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_10(t_measured(1:500:end))
, 'k-.');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_11(t_measured(1:500:end))
, 'g-.');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_12(t_measured(1:500:end))
, 'b-.');
hold on
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
plot(t_measured(1:500:end),F_15(t_measured(1:500:end))
, 'y--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_16(t_measured(1:500:end))
, 'm--');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_17(t_measured(1:500:end))
, 'y:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_18(t_measured(1:500:end))
, 'm:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_19(t_measured(1:500:end))
, 'c');
hold on
plot(t_measured(1:500:end),F_20(t_measured(1:500:end))
, 'c:', ...
'LineWidth',1.25);
hold on
ylim([15 45]);
xlim([0 114]); %inyección
%xlim([115 150]);
%xticklabels([0 5 10 15 20 25 30 35]);
legend('1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','
12','15', ...
'16','17','18','19','20', 'NumColumns', 3);
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Temperatura (°C)');

%% Gráficas de la potencia y temperaturas datos
Testsite

A=mean(W2(7727:13113));
B=mean(W3(7727:13113));
C=A/4;
D=B/4;
Tmedial=zeros(14513,1);
Tmedia2=zeros(14513,1);
for i=1:14513
    Tmedia2(i,1)=(T22(i,1)+T23(i,1))/2;
    Tmedial(i,1)=(T32(i,1)+T33(i,1))/2;
end
figure(2)
plot(tiempo_measured, T32, 'm');
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
hold on
plot (tiempo_measured, T22, 'r');
hold on
plot (tiempo_measured, T33, 'c');
hold on
plot (tiempo_measured, T23, 'k');
hold on
plot(tiempo_measured, Ta, 'b');
hold on
%xlim([0 253]); %Todo el intervalo
xlim([89 114]); % recirculacion
xticks([89 94 99 104 109 114]);
xticklabels([0 5 10 15 20 25]);
%xlim([110 235]); %Inyección de calor
%xticks([113 130 150 170 190 210 230]);
%xticklabels([0 20 40 60 80 100 120]);
legend('Temperatura de entrada z1', 'Temperatura de
entrada z2', ...
'Temperatura de salida z1', 'Temperatura de salida
z2', ...
'Temperatura ambiente', 'Location', 'west');
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Temperatura (°C)');

figure(3)
plot (tiempo_measured, Tmedial, 'm');
hold on
plot (tiempo_measured, Tmedia2, 'r');
hold on
plot(tiempo_measured, Ta, 'b');
hold on
xlim([0 45]); %circulacion
%xlim([228 253]); % recuperación
%xticks([230 234.5 239 243.5 248 252.5]);
%xticklabels([0 5 10 15 20 25]);
legend('Temperatura media en el intercambiador z1',
...
'Temperatura media en el intercambiador
z2', 'Temperatura ambiente', ...
'Location', 'north');
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Temperatura (°C)');

figure(4)
plot (tiempo_measured, W3, 'm');
hold on
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
plot (tiempo_measured, W2, 'r');
hold on
xlim([130 235]);
xticks([135 152 169 186 203 220 235]);
xticklabels([0 20 40 60 80 100 120]);
legend('Potencia disipada z1','Potencia disipada
z2','Location','west');
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Potencia (W)');

% Crear puntos alejados a la temperatura del terreno
sin perturbar

%El terreno sin perturbar se estable a 1m -> 100 cm,
en X a 50, 150,
% 200, 250, 300, 350, y 400 y en Z 0, 18 y 35 cm

x_alejado=[0 0 0 50 50 50 100 100 100 150 150 150 200
200 200 250 250 ...
250 300 300 300 350 350 350 400 400 400];
z_alejado=[0 18 35 0 18 35 0 18 35 0 18 35 0 18 35 0
18 35 0 18 35 0 ...
18 35 0 18 35];
y_alejado=ones(27, 1)*100;
Temp_alejado=ones(27,1)*15.4;

x_combinado=zeros(413668,1);
y_combinado=x_combinado;
z_combinado=x_combinado;
Temp_combinado=x_combinado;
t_combinado=x_combinado;

x_combinado2=zeros(370510,1);
y_combinado2=x_combinado2;
z_combinado2=x_combinado2;
Temp_combinado2=x_combinado2;
t_combinado2=x_combinado2;

% Para la zanja 1
i=1;
j=2;
p=1;
k=1;
c=1;
for j=j:171619
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
    if idx_zanja1(j-1,1)==idx_zanja1(j,1)-1
        x_combinado(i,1)=x_measured(idx_zanja1(j-1,1));
        y_combinado(i,1)=y_measured(idx_zanja1(j-1,1));
        z_combinado(i,1)=z_measured(idx_zanja1(j-1,1));
        t_combinado(i,1)=t_measured(idx_zanja1(j-1,1));

Temp_combinado(i,1)=Temp_measured(idx_zanja1(j-1,1));
        i=i+1;
        k=i;
        c=j-1;
    else
        for k=k:k+26
            x_combinado(k,1)=x_alejado(p);
            y_combinado(k,1)=y_alejado(p);
            z_combinado(k,1)=z_alejado(p);

t_combinado(k,1)=t_measured(idx_zanja1(c,1));
            Temp_combinado(k,1)=Temp_alejado(p);
            p=p+1;
        end
        p=1;
        i=i+26;
    end
end

%Para la zanja 2
i=1;
j=2;
p=1;
k=1;
c=1;
for j=j:128461
    if idx_zanja2(j-1,1)==idx_zanja2(j,1)-1
        x_combinado2(i,1)=x_measured(idx_zanja2(j-1,1));
        y_combinado2(i,1)=y_measured(idx_zanja2(j-1,1));
        z_combinado2(i,1)=z_measured(idx_zanja2(j-1,1));
        t_combinado2(i,1)=t_measured(idx_zanja2(j-1,1));
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
Temp_combinado2(i,1)=Temp_measured(idx_zanja2(j-1,1));
    i=i+1;
    k=i;
    c=j-1;
else
    for k=k:k+26
        x_combinado2(k,1)=x_alejado(p);
        y_combinado2(k,1)=y_alejado(p);
        z_combinado2(k,1)=z_alejado(p);

t_combinado2(k,1)=t_measured(idx_zanja2(c,1));
        Temp_combinado2(k,1)=Temp_alejado(p);
        p=p+1;
    end
    p=1;
    i=i+26;
end
end

%% Interpolación de la temperatura en el tiempo y
espacio
% Con Scattered Data Interpolation and Approximation
using Radial Base
% Functions instalado

AA=[x_combinado y_combinado z_combinado t_combinado];
AA2=[x_combinado2 y_combinado2 z_combinado2
t_combinado2];

C=103;
N=92;
p=1;

for i=1:C

RBF_(i)=rbfcreate(AA(p:p+5000,:),' ,Temp_combinado(p:p+5
000) ');
    p=p+4000;
end
p=1;
for i=1:N

RBF2_(i)=rbfcreate(AA2(p:p+5000,:),' ,Temp_combinado2(p:
p+5000) ');
    p=p+4000;
end
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
% La interpolación de todos los datos para las dos
zanjas dura 1 hora, una
% vez hecho mejor cargarlo:

%RBF_abrir=load('RBFestructura_.mat');
%RBF2_abrir=load('RBFestructura2_.mat');
%RBF_=RBF_abrir(1).RBF_;
%RBF2_=RBF2_abrir(1).RBF2_;

%% Contornos y cortes volumétricos en un determinado
tiempo

[xxq,yyq]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(0,100,1
0));
[xxq2,zzq2]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(-
20,50,7));
[xxq3,yyq3,zzq3]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(
0,100,10), ...
linspace(0,35,5));
tquery=160; %ELECCIÓN DEL TIEMPO
zquery=18; % Profundidad = 18cm (Centro del
intercambiador)
yquery=0; % Distancia Y = 0cm (Sobre el
intercambiador)
xslice=[50,100,150,200,250,300,350,400];
yslice=[];
zslice=[0,18,35];
i=1;
p=1;
s=1;
l=1;
while tquery>AA(p+5000,4)
    p=p+4000;
    i=i+1;
end
VALUES=rbfinterp([xxq(:)';yyq(:)';zquery*ones(1,40*10)
;...
    ones(1,40*10)*tquery],RBF_(i));
VAL=rbfinterp([xxq2(:)';yquery*ones(1,40*7);zzq2(:)';.
..
    ones(1,40*7)*tquery],RBF_(i));
VALU=rbfinterp([xxq3(:)';yyq3(:)';zzq3(:)';ones(1,40*1
0*5)*tquery],...
RBF_(i));

while tquery>AA2(s+5000,4)
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
s=s+4000;
l=l+1;
end
VALUES2=rbfinterp([xxq(:)';yyq(:)';zquery*ones(1,40*10
);...
ones(1,40*10)*tquery],RBF2_(1));
VAL2=rbfinterp([xxq2(:)';yquery*ones(1,40*7);zzq2(:)';
...
ones(1,40*7)*tquery],RBF2_(1));
VALU2=rbfinterp([xxq3(:)';yyq3(:)';zzq3(:)';ones(1,40*
10*5)*tquery],...
RBF2_(1));

figure(5);
subplot(3,2,1);
contourf(xxq,yyq,reshape(VALUES,size(xxq)),8);
title(sprintf('ZANJA1 Tiempo %.2f horas',tquery));
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Y. Distancia desde el intercambiador');
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,2);
contourf(xxq,yyq,reshape(VALUES2,size(xxq)),8);
title(sprintf('ZANJA2 Tiempo %.2f horas',tquery));
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Y. Distancia desde el intercambiador');
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,3);
contourf(xxq2,zzq2,reshape(VAL,size(xxq2)),8);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Z. Profundidad');
ylim([0 35]);
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,4);
contourf(xxq2,zzq2,reshape(VAL2,size(xxq2)),8);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Z. Profundidad');
ylim([0 35]);
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,5);
slice(xxq3,yyq3,zzq3,reshape(VALU,size(xxq3)),xslice,y
slice,zslice);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
ylabel('Eje Y. Distancia desde el intercambiador');
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
zlabel('Eje Z. Profundidad');
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,6);
slice(xxq3,yyq3,zzq3,reshape(VALU2,size(xxq3)),xslice,
yslice,zslice);
colorbar;
caxis([15 43]);

%UN SOLO COLORBAR PARA LOS 6: Hay que ponerlos primero
en cada subplot
%para que se adapten al rango
subplot(3,2,1)
colorbar off
subplot(3,2,2)
colorbar off
subplot(3,2,3)
colorbar off
subplot(3,2,4)
colorbar off
subplot(3,2,5)
colorbar off
subplot(3,2,6)
colorbar off

cbax = axes('visible','off');
caxis(cbax,[15,43]);
h = colorbar(cbax,'location','eastoutside','position',...
[.93 .3 .02 .6] );

%% Contornos y cortes volumétricos en función del
tiempo

[xxq,yyq]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(0,100,10));
[xxq2,zzq2]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(-20,50,7));
[xxq3,yyq3,zzq3]=meshgrid(linspace(0,400,40),linspace(0,100,10),...
linspace(0,35,5));
tquery=20;
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
zquery=18; % Profundidad = 18cm (Centro del
intercambiador)
yquery=0; % Distancia Y = 0cm (Sobre el
intercambiador)
xslice=[50,100,150,200,250,300,350,400];
yslice=[];
zslice=[0,18,35];
tiempos=linspace(t_combinado(1),t_combinado(411898),20
0);
i=1;
p=1;
s=1;
l=1;

% Crear un video
%myVideo = VideoWriter('myVideoFile');
%myVideo.FrameRate = 10;
%open(myVideo)

for tquery=tiempos
    if tquery<AA(p+5000,4)

VALUES=rbfinterp([xxq(:)';yyq(:)';zquery*ones(1,40*10)
;...
                ones(1,40*10)*tquery],RBF_(i));

VAL=rbfinterp([xxq2(:)';yquery*ones(1,40*7);zzq2(:)';.
..
                ones(1,40*7)*tquery],RBF_(i));
    VALU=rbfinterp([xxq3(:)';yyq3(:)';zzq3(:)';...
                ones(1,40*10*5)*tquery],RBF_(i));
    elseif tquery>AA(p+5000,4)
        p=p+4000;
        i=i+1;
    end

    if tquery<AA2(s+5000,4)

VALUES2=rbfinterp([xxq(:)';yyq(:)';zquery*ones(1,40*10)
);...
                ones(1,40*10)*tquery],RBF2_(1));

VAL2=rbfinterp([xxq2(:)';yquery*ones(1,40*7);zzq2(:)';
...
                ones(1,40*7)*tquery],RBF2_(1));
    VALU2=rbfinterp([xxq3(:)';yyq3(:)';zzq3(:)';...
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
        ones(1,40*10*5)*tquery],RBF2_(1));
elseif tquery>AA(s+5000,4)
    s=s+4000;
    l=l+1;
end

figure(6);
subplot(3,2,1);
contourf(xxq,yyq,reshape(VALUEs,size(xxq)),8);
title(sprintf('ZANJA1 Tiempo %.2f horas',tquery));
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Y. Distancia desde el
intercambiador');
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,2);
contourf(xxq,yyq,reshape(VALUEs2,size(xxq)),8);
title(sprintf('ZANJA2 Tiempo %.2f horas',tquery));
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Y. Distancia desde el
intercambiador');
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,3);
contourf(xxq2,zzq2,reshape(VAL,size(xxq2)),8);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Z. Profundidad');
ylim([0 35]);
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,4);
contourf(xxq2,zzq2,reshape(VAL2,size(xxq2)),8);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Z. Profundidad');
ylim([0 35]);
colorbar;
caxis([15 43]);
subplot(3,2,5);

slice(xxq3,yyq3,zzq3,reshape(VALU,size(xxq3)),xslice,yslice,zslice);
    xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
    ylabel('Eje Y. Distancia desde el
intercambiador');
    zlabel('Eje Z. Profundidad');
    colorbar;
```

Análisis de la Eficiencia Térmica de Intercambiadores Geotérmicos Horizontales Planos con Diferentes Tipos de Relleno.

```
caxis([15 43]);
subplot(3,2,6);

slice(xxq3,yyq3,zzq3,reshape(VALU2,size(xxq3)),xslice,
yslice,zslice);
xlabel('Eje X. Longitud del intercambiador');
ylabel('Eje Y. Distancia desde el
intercambiador');
zlabel('Eje Z. Profundidad');
colorbar;
caxis([15 43]);

%UN SOLO COLORBAR PARA LOS 6: Hay que ponerlos
primero en cada
%subplot para que se adapten al rango
subplot(3,2,1)
colorbar off
subplot(3,2,2)
colorbar off
subplot(3,2,3)
colorbar off
subplot(3,2,4)
colorbar off
subplot(3,2,5)
colorbar off
subplot(3,2,6)
colorbar off

cbax = axes('visible', 'off');
caxis(cbax, [15, 43]);
h = colorbar(cbax, 'location',
'eastoutside','position',...
[.93 .3 .02 .6] );

pause(0.5);

%frame = getframe(gcf);
%writeVideo(myVideo, frame);

end

%close(myVideo)
```