



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELACIÓN TÉRMICA DEL SUELO ALREDEDOR DE TUBOS ENTERRADOS
EN SISTEMAS DE COLECCIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA**

MEMORÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ALONSO ZENTENO ARENAS

PROFESOR GUÍA:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

SANTIAGO DE CHILE
2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico.

POR: Alonso Gonzalo Zenteno Arenas

FECHA: 09/08/2013

PROFESOR GUÍA: Ramón Frederick González

**MODELACIÓN TÉRMICA DEL SUELO ALREDEDOR DE TUBOS ENTERRADOS EN
SISTEMAS DE COLECCIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA**

Los sistemas de climatización con energía geotérmica, aprovechan la estabilidad de temperatura que tiene el subsuelo para extraer calor de la vivienda y transferirlo al suelo, o de forma inversa, extraer calor del suelo y transferirlo a la vivienda (depende si se trata de invierno o verano). Para realizar esto se usan tubos enterrados en que se hace circular un fluido interiormente para transportar el calor.

En la literatura se proponen métodos incompletos para calcular la capacidad de transferencia entre los tubos enterrados y el suelo, ya que no se considera la modificación de temperatura del suelo alrededor de los tubos enterrados.

En este trabajo, usando simulaciones numéricas, se resuelve el campo de temperaturas alrededor de los tubos en función del tiempo y se determina la resistencia térmica del suelo. Usando los resultados de estas simulaciones, se propone una fórmula (en función de las variables relevantes) para estimar de forma sencilla el promedio de capacidad de transferencia que tendrá un tubo.

Se realizan simulaciones con 2 y 3 tubos paralelos, para evaluar la disminución de la capacidad de transferir calor debido a la interferencia térmica que se produce entre tubos cercanos. Estos resultados muestran que el espaciado, es un factor importante a la hora de diseñar un circuito de tubos enterrados, ya que con arreglos muy compactos se disminuye en más un 50% la capacidad de captar calor.

Con los resultados de las simulaciones se evalúan cuatro casos, para determinar cuán importante es agregar la resistencia térmica del suelo, a las conocidas y bien estudiadas resistencias térmicas de la pared del tubo y del fluido interno. De forma general, el suelo restringe el flujo de calor (más que la pared y el fluido interno) y se vuelve el elemento clave para determinar la capacidad de transferencia.

Cuantificar este fenómeno, permite diseñar sistemas de colección, tomando en cuenta la resistencia térmica del suelo y determinar correctamente la capacidad de transferir calor. Así, se puede generar una solución acorde a la demanda térmica requerida.

AGRADEMIENTOS

En primer lugar a mis compañeros Christian Nilo y Ignacio Núñez, ya que formar un grupo de estudio junto a ellos en primer año fue la razón para no desertar de esta carrera en mis años de mechón. Si no hubiera tenido la suerte de encontrarme con estos grandes amigos, difícilmente estaría escribiendo estos agradecimientos. Gracias “Jailon” y “Tarzán”.

A mi madre por su amor infinito, siempre intentando brindarme las mejores condiciones para que pudiera estudiar. Gracias madre.

A mi padre por su inmenso cariño.

A todos mis amigos mecánicos que hicieron que mis años en Beauchef sean dignos de recordad como una época feliz. Agradecer especialmente a Nilo, Huaso, Roberto y Curi.

A mi profesor guía Ramón Frederick por su gran apoyo, dedicación y paciencia.

A mi hijo Pascual por ser mi motivación más grande en mis últimos años de Universidad. Te amo guatón rico.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Sistemas de colección de energía geotérmica.....	1
1.2. Motivación.....	3
1.2.1. ¿Por qué es importante estudiar estos sistemas?.....	3
1.2.2. ¿Cuál es el problema que se ataca en este trabajo?.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcances.....	5
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1. Métodos de diseño en sistemas de tubos enterrados.....	7
2.2. Temperatura y propiedades de la tierra.....	9
2.2.1. Temperatura del suelo.....	9
2.2.2. Propiedades térmicas del suelo.....	9
2.3. Modelación analítica de temperatura de la tierra alrededor de un tubo.....	11
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1. Software.....	13
3.2. Hardware.....	13
4. DESARROLLO Y RESULTADOS.....	14
4.1. Modelo en COMSOL.....	14
4.1.1. Geometría y condiciones de borde.....	14
4.1.2. Definición de parámetros.....	14
4.1.3. Tamaño de la región.....	16
4.1.4. Mallado.....	18
4.2. Perfil de temperatura para tubo único.....	20
4.3. Flujo de calor del tubo al suelo.....	22
4.4. Influencia de variables de interés en el flujo de calor.....	24
4.4.1. Rangos de variables.....	24
4.4.2. Diferencia de temperatura.....	25
4.4.3. Conductividad térmica del suelo.....	26
4.4.4. Calor específico volumétrico.....	27

4.4.5.	Radio del tubo.....	27
4.4.6.	Horizonte temporal	28
4.4.7.	Factores que influyen en la conductancia.....	28
4.5.	Interferencia térmica en arreglos de tubos	31
4.5.1.	Perfil de temperatura en arreglos de 2 tubos.....	32
4.5.2.	Flujo de calor en arreglo de 2 tubos	34
4.5.3.	Porcentaje de interferencia en arreglo de 2 tubos	35
4.5.4.	Perfil de temperatura en arreglo de 3 tubos.....	37
4.5.5.	Flujo de calor en arreglo de 3 tubos	39
4.5.6.	Porcentaje de interferencia térmica en arreglos de 3 tubos.....	40
4.5.7.	Comparación tubos laterales con tubos centrales en arreglos de 3 tubos..	41
4.5.8.	Comparación tubos laterales en arreglos de 2 y 3 tubos	43
4.6.	Estudio de casos.....	44
4.6.1.	Cálculo U global.....	44
4.6.2.	Análisis de casos	44
5.	DISCUSIÓN.....	47
5.1.	Métodos numéricos y sus resultados	47
5.2.	Algunos criterios de diseño para sistemas de tubo único.....	48
5.3.	Sistemas de dos o más tubos. Interferencia térmica entre tubos	49
6.	CONCLUSIONES	52
7.	REFERENCIAS	54

1.INTRODUCCIÓN

1.1. Sistemas de colección de energía geotérmica

El aprovechamiento de la energía geotérmica, puede clasificarse en 2 grandes grupos según los rangos de temperatura (o potencial entálpico) de los yacimientos. Las aplicaciones que requieren de altas temperaturas, se relacionan con vulcanismo y producción de energía, mientras que las aplicaciones que requieren baja entalpía se utilizan para climatizar hogares o para calentar agua.

Los sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía, son sistemas que mediante la circulación de un fluido por tubos enterrados, entregan calor a la tierra o absorben calor de ella, aprovechando la estabilidad de temperatura que existe en el subsuelo poco profundo. En invierno, el calor que se obtiene desde el suelo (fuente de calor) y se transporta hacia el interior de la vivienda, mientras que en verano se transporta calor desde la casa hacia el suelo (sumidero de calor).

Existen dos sistemas ampliamente utilizados:

1) **Intercambiador de calor Aire-Tierra:** Se introduce aire a la casa, le que previamente pasa por un tubo enterrado. De este modo el aire se enfría o calienta (según se requiera) antes de entrar a la casa (Figura 1-1).

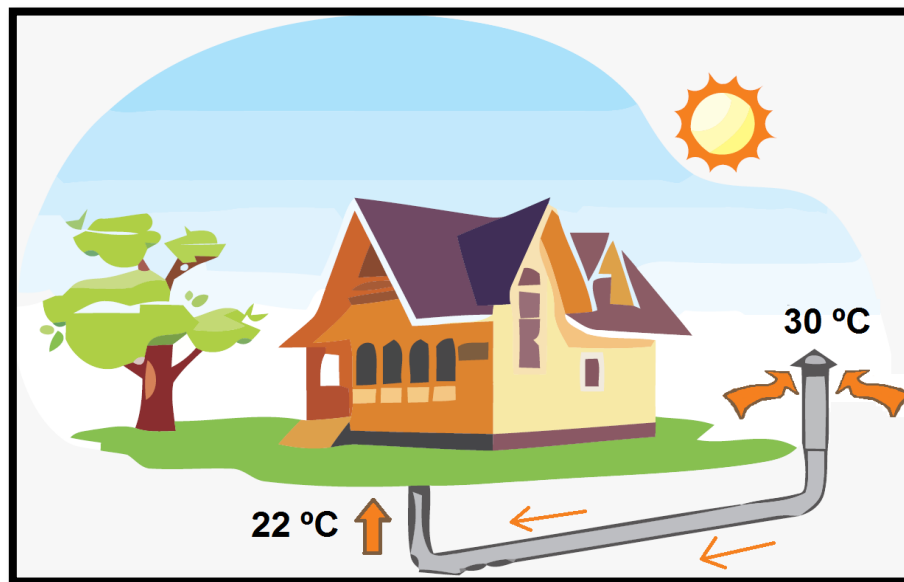


Figura 1-1: Intercambiador Aire-Tierra. Caso verano. Se absorbe aire caliente desde el exterior y se enfría antes de ser inyectado a la vivienda.

2) **Bomba de calor geotérmica:** Este sistema usa una bomba de calor muy similar a los de aire acondicionado convencionales. La diferencia radica en que la bomba de

calor, transfiere calor a la tierra en lugar de transferirlo al aire exterior, aprovechando de este modo las temperaturas más favorables del subsuelo poco profundo, en relación a la temperatura del aire exterior. Un circuito cerrado de un fluido (típicamente agua con anticongelante) se hace circular por tuberías enterradas, transportando la energía al circuito de la bomba de calor (Figura 1-2 y Figura 1-3).



Figura 1-2: Bomba de calor geotérmica. Circuito cerrado enterrado para transportar energía a la bomba de calor.

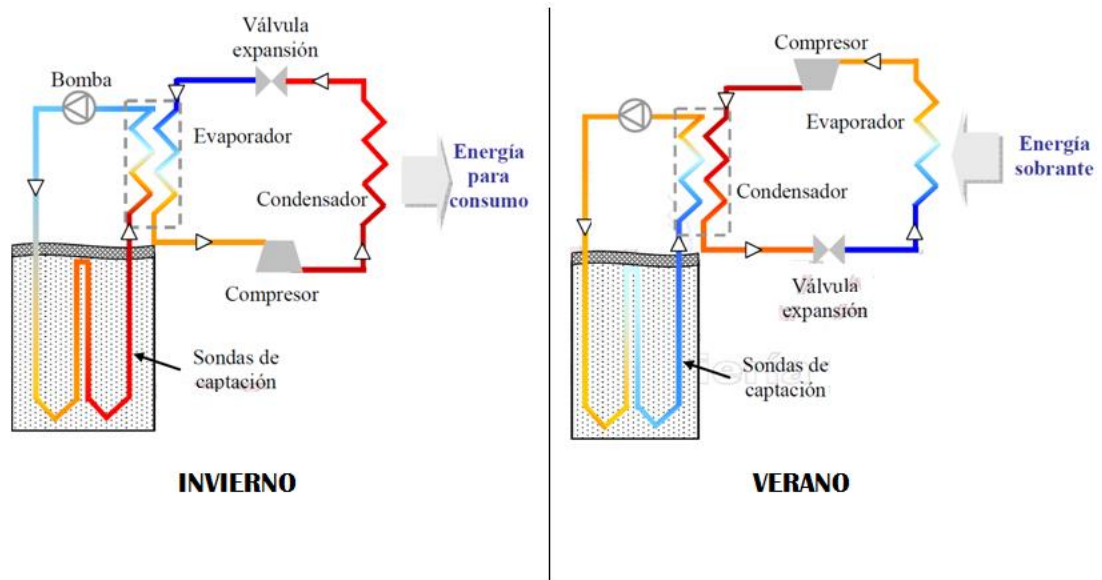


Figura 1-3: Bomba de calor geotérmica. Diagrama de sistema de colección y bomba de calor.

1.2. Motivación

1.2.1. ¿Por qué es importante estudiar estos sistemas?

La climatización con energía geotérmica es muy eficiente en comparación a otras tecnologías, con ahorros de consumos entre 30% y 70% en calefacción, y entre 20% y 50% en aire acondicionado (bomba de calor geotérmica), sin perder los niveles de confort térmico (1). Como consecuencia directa de la gran eficiencia, las emisiones de CO₂ relacionadas a la climatización de ambientes son considerablemente menores. Otras ventajas son: la escasez de ruido, los bajos requerimientos de mantenimiento y una vida útil entre 25 a 50 años dependiendo de las características de la instalación. Las principales desventajas de estos sistemas, son los altos costos de instalación y la necesidad de amplios espacios para disponer las tuberías.

Los altos niveles de eficiencia, en comparación a los sistemas convencionales de climatización, posicionan la energía geotérmica como una alternativa ecológica real, en el contexto mundial que tiende hacia energías limpias. En los últimos años, en países desarrollados ha existido un crecimiento explosivo en el número de nuevas instalaciones.

Si bien la geotérmica de baja entalpía usa tecnologías probadas y funcionales, muchas veces se definen parámetros de diseño siguiendo recomendaciones técnicas generales. Un diseño adecuado debe considerar las características particulares de cada proyecto, pues de modo contrario, se invierte mucho dinero en una instalación que no brindará buena eficiencia.

1.2.2. ¿Cuál es el problema que se ataca en este trabajo?

El diseño del sistema de tubos enterrados para la colección de energía, debe realizarse con gran cuidado. Decisiones equivocadas en la configuración (largo, diámetro o disposición de los tubos) son errores altamente costosos.

En la literatura, varios modelos de cálculo suponen que la temperatura de la pared externa del tubo es igual a la temperatura del suelo sin perturbación (Figura 1-4 izquierda). De esta forma se ignora la resistencia térmica del suelo, la cual debido a su baja conductividad y difusividad térmica, es un elemento restrictivo de la transferencia de calor y no considerarlo significaría sobreestimar la capacidad de transferencia de calor por parte del sistema de colección.

El fenómeno que se pasa por alto en estos modelos, es que al absorber o entregar calor a la tierra, se modifica la temperatura del suelo alrededor de los tubos a medida que transcurre el tiempo. Entonces, disminuye la diferencia de temperatura entre el fluido dentro de los tubos y el suelo, reduciéndose así la capacidad de transferencia de calor.

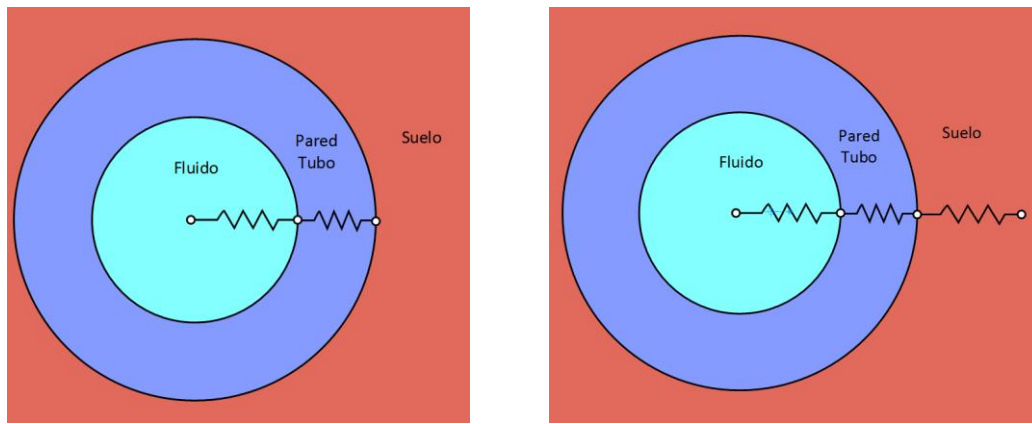


Figura 1-4: A la izquierda modelo incompleto usado con frecuencia en la literatura para métodos de diseño (no se considera la resistencia térmica del suelo). A la derecha el modelo a estudiar.

Por otro lado, en edificios de gran magnitud, se requieren grandes flujos de calor para satisfacer las necesidades de climatización, lo que significaría una gran extensión de tubos. Si existen restricciones de espacio, los tubos se deben enterrar en arreglos compactos, lo cual generaría interacción térmica entre ellos, disminuyendo así la capacidad de absorber o entregar calor.

Por lo tanto, tiene gran importancia poder evaluar la influencia de la interacción térmica entre tubos. La comprensión de este fenómeno, permitiría establecer mejores criterios de diseño, principalmente en proyectos que dispongan de espacios reducidos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo del presente trabajo de memoria consiste en modelar térmicamente en 2D el campo de temperatura del suelo alrededor de tubos para sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía. Con esto se busca obtener la capacidad de intercambio térmico del tubo y su dependencia de diferentes variables.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recolección de antecedentes de sistemas de climatización geotérmica.
- Definición de un modelo en COMSOL (geometría, ecuaciones gobernantes y condiciones de borde) que represente adecuadamente el problema de transferencia de calor por conducción entre el suelo y los tubos enterrados. Análisis de la sensibilidad del mallado para el modelo.
- Simulaciones del el campo de temperatura transiente alrededor de un tubo con variación del radio de tubo, conductividad térmica del suelo, capacidad calorífica volumétrica del suelo, diferencia de temperatura entre el tubo y el suelo y horizonte temporal.

- Representar los resultados de las simulaciones mediante una fórmula de la conductancia promedio del suelo en función de variables relevantes a partir de los resultados numéricos usando las técnicas de ajuste de datos proporcionadas por el software EUREQA.
- Simulaciones del campo de temperatura del suelo alrededor de arreglos de 2 y 3 tubos paralelos, para diferentes radios de tubos y separaciones.
- Estudio de la interferencia térmica entre los tubos. Representación de interferencia térmica mediante una fórmula sencilla para arreglos de 2 tubos usando el software EUREQA.
- Estudio de casos para cuantificar la relevancia de agregar la resistencia térmica del suelo, a las usualmente consideradas resistencia térmica de la pared del tubo y la resistencia térmica del fluido interno.

1.4. Alcances

El tema se centra en el problema de transferencia de calor entre el suelo y los tubos de colección de energía. Para diseñar un sistema de aprovechamiento de la energía del suelo, se debe considerar tres fenómenos de transferencia en serie (Figura 1-4 derecha):

- a) Transferencia de calor conductiva entre el suelo y el tubo.
- b) Transferencia de calor conductiva en la pared del tubo.
- c) La resistencia térmica convectiva del fluido interno.

Como la conductividad térmica de la tierra es baja, la resistencia térmica de la pared del tubo y la del fluido interno son bajas en comparación a la resistencia térmica entre el suelo y el tubo.

Dado que los problemas b) y c) son suficientemente conocidos, en este trabajo se propone centrar la atención en el problema a). Una vez comprendido bien este fenómeno, se pueden agregar las resistencias térmica del tubo y del fluido interno.

Se considera solo tubos horizontales. Con esta configuración se elimina la variación vertical de temperatura del medio a medida que el fluido avanza dentro del tubo.

Por último, se considera tubos enterrados a una profundidad suficiente, de modo que no exista interacción térmica con la superficie, ni que exista un perfil de temperatura vertical.

Se considera el suelo como un medio homogéneo isótropo con propiedades constantes.

Los resultados se basan únicamente en simulaciones numéricas que utilizan el software COMSOL.

Los modelos numéricos usan una temperatura del tubo mayor que la temperatura inicial del medio (caso verano). Se supone equivalencia con el caso en que la temperatura del fluido es menor (caso invierno).

2. ANTECEDENTES

2.1. Métodos de diseño en sistemas de tubos enterrados

El diseño de tubos enterrados ha sido analizado en diversos artículos, algunos de los cuales son significativos, como los siguientes:

De Paepe y Jannssens (2003) consideran el sistema aire – tierra y entrega un método sencillo para dimensionar el intercambiador de calor enterrado, ya que los modelos tridimensionales requieren mucho trabajo y análisis y no pueden ser utilizados directamente por el diseñador. Considera que hay un contacto perfecto entre la pared de los tubos y el suelo, y que la conductividad térmica del suelo es muy alta comparada con la resistencia superficial. En esas condiciones, asume que la temperatura de pared interna del tubo es constante y que los parámetros de diseño serán independientes del tipo de suelo y de las condiciones climáticas. Esto implica ignorar la resistencia térmica de la tierra y la interferencia entre los tubos. Se desarrolla el método incluyendo los detalles del flujo y la transferencia de calor en el interior del tubo, proceso que se supone dominante (2).

Florides y Kalogirou (2007) revisan los diferentes métodos de cálculo o diseño que hay en la literatura, para intercambiadores de calor subterráneos. Los principales datos de entrada son: las características geométricas del sistema, las características térmicas del suelo, las características del tubo y la temperatura no perturbada del suelo durante la operación del sistema.

Al inicio del estudio de sistemas geotérmicos, se usaron modelos unidimensionales que fueron reemplazados por modelos bidimensionales en los 90s y modelos 3D en años recientes. Los modelos actuales se han refinado para entregar más detalles en la variación de temperatura alrededor de los tubos. Se han monitoreado variadas instalaciones prototipo con resultados satisfactorios.

El uso de estos sistemas requiere conocer el perfil de temperatura del suelo en la superficie y a diversas profundidades. Usualmente la profundidad recomendada para intercambiadores horizontales es de 1,5 a 2m. Para minimizar la interferencia entre tubos, se recomienda una separación de 30 cm entre tubos y las trincheras deben estar separadas en al menos 2m. Un típico loop horizontal es de 35–60m de longitud por kW de capacidad de calentamiento o enfriamiento.

Un intercambiador vertical (vertical borehole heat exchanger) se perfora a profundidades de 20–300 m con diámetros de 10–15 cm. Estos sistemas se componen de un número grande de tubos individuales.

Generalmente, la efectividad de intercambiadores aire-tierra aumenta con un aumento en el largo del tubo. Hay también un aumento en efectividad cuando el tubo se ubica a

mayores profundidades. La capacidad calefactora del sistema se reduce al aumentar el diámetro de tubo. Una mayor velocidad de aire en el tubo lleva a una reducción de la capacidad calefactora del sistema (3).

Yoon et al. (2009) propone un procedimiento de diseño para intercambiadores tierra-aire. Se discute el método de diseño cuando el intercambiador consiste en múltiples tubos con un arreglo de tubos cercanos.

Métodos publicados previamente se ocupaban preferentemente de tubos únicos. Cuando los tubos son múltiples el problema más importante es la interferencia térmica entre tubos vecinos.

Considera el caso particular: el de un edificio público con tubos de 0,5 m diámetro, de PVC, con espesor 14 mm, y con largos entre 34 y 46 m. La velocidad máxima de aire es de 2,57 m/s.

El arreglo es de dos filas horizontales de tubos, con un espaciado vertical de 1,5 m, y espaciado horizontal de 0,8 m. Los tubos están ubicados a profundidades de 2 m aproximadamente, de modo que hay interacciones térmicas con el ambiente exterior.

Se desarrolló un modelo numérico para este sistema, el cual fue verificado por mediciones en terreno. Tomando en cuenta la interferencia térmica entre tubos, el desempeño de transferencia de calor, fue evaluada bajo varias condiciones de diseño tales como número de tubos, arreglo, longitud, velocidad del aire, y propiedades del suelo. En base a estos resultados, se propone un método de estimación para la transferencia de calor para el sistema de multitubos.

Las características de transferencia de calor de tubos múltiples con interferencia térmica entre tubos adyacentes se examinaron por simulaciones numéricas. En base a estos resultados, se produjeron expresiones aproximadas.

Estas, hacen posible predecir la tasa de transferencia de calor tomando en cuenta la influencia termal entre tubos adyacentes. Conociendo la transferencia de calor para un tubo único, es posible evaluar la transferencia de calor anual para tubos múltiples.

El método de predicción usando expresiones aproximadas, está disponible para un rango específico de parámetros. Es un método muy simple y facilita la elección del espaciado entre tubos (4).

2.2. Temperatura y propiedades de la tierra

2.2.1. Temperatura del suelo

La temperatura de la tierra a profundidades no muy grandes (< 20m) está gobernada por factores climáticos como temperatura del aire, radiación solar y lluvias. Existen fluctuaciones diarias, las cuales afectan la capa más externa (hasta 1m aproximadamente) y fluctuaciones estacionales que producen variaciones hasta unos 10m de profundidad. La variación anual de temperaturas promedio diarias, puede estimarse usando una función sinusoidal (Hilley, 1982):

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right]$$

z : Profundidad en metros

t : Tiempo

T_m : Temperatura media anual del aire.

A_s : Amplitud anual de temperatura superficial del suelo.

t_o : Desfase

α : Difusividad térmica

La temperatura oscila en torno a una temperatura media y la oscilación se atenúa a medida que se aumenta la profundidad. A profundidades considerables (10m), la temperatura es prácticamente constante durante todo el año.

2.2.2. Propiedades térmicas del suelo

Las propiedades térmicas suelo, dependen de diversos factores, como el contenido de agua, porosidad y granulometría. En las Tabla 2-1, Tabla 2-2 y la Tabla 2-1 se muestran propiedades térmicas de distintos tipos de suelo.

Tabla 2-1: Conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica de distintos tipos de suelo (5).

Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]			Capacidad térmica volumétrica
	Mínimo	Valor típico	Máximo	[MJ/m ³ K]
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4 - 1,6
Grava, saturada de agua	-	aprox 1,8	-	aprox 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3 – 1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2 – 2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5 – 1,6
Arcilla/limo, saturada de agua	0,9	1,7	2,3	1,6 – 3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5 – 3,8

Tabla 2-2: Propiedades térmica de distintos tipos de suelo (6).

Tipo de suelo	Densidad [Kg/m ³]	Conductividad [W/mK]	Capacidad Calorífica [kJ/kgK]
Grava gruesa	2000	0,52	1,84
Oxido de calcio	1670	2,23	0,71
Arcilla arenosa	1650	2,3	2,85
Arcilla arenosa húmeda	1800	1,49	1,34
Arena	1780	0,93	1,39
Arena seca	1500	0,7	0,92

Tabla 2-3: Difusividad térmica de distintos tipos de suelo.

	Difusividad [cm ² /s]	%min	Min	%max	Max
Arena	0,0023	50	55	90	50
Arcilla	0,0025	20	20	30	25
Agua	0,0059	15	15	20	20
Cuarzo	0,084	0	0	5	5
Material Orgánico	0,00058	0	10	10	0

2.3. Modelación analítica de temperatura de la tierra alrededor de un tubo

Carslaw y Jaeger (7) proponen una solución a la distribución de temperatura alrededor de un tubo enterrado en un medio infinito. La temperatura dependerá de la posición radial y del tiempo.

Se considera una tubería enterrada, de radio exterior R . La tubería y los alrededores tienen una temperatura inicial T_0 . Luego, repentinamente un fluido ingresa con temperatura T_0 .

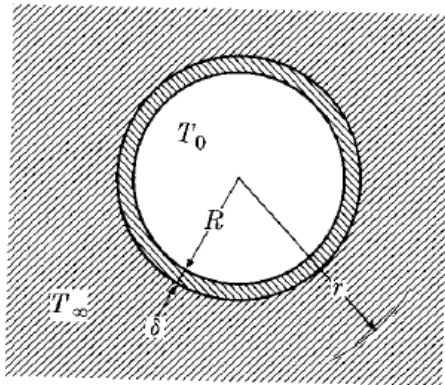


Figura 2-1: Modelo de tubería para solución analítica.

Se desprecia la caída de temperatura en la pared de la tubería debido a su bajo espesor y alta conductividad térmica.

Se formula el problema en términos de $\theta = T - T_\infty$.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

Y las condiciones de borde:

- Temperatura inicial en todo el campo T_∞ : $\theta(r, 0) = 0$
- Temperatura en el borde del tubo: $\theta(R, t) = \theta_0$
- Temperatura a distancias lejanas del tubo no varían: $\lim_{r \rightarrow \infty} \theta(r, t) \rightarrow 0$

El problema, como involucra medios infinitos, no es resoluble por series de Fourier sino que por la transformada de Laplace. La solución de este problema es en términos de θ .

$$\frac{\theta(r, t)}{\theta_0} = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-au^2t} \left[\frac{J_0(ur)Y_0(uR) - J_0(uR)Y_0(ur)}{J_0^2(uR) + Y_0^2(uR)} \right] \frac{du}{u}$$

$$\theta_0 = T_0 - T_\infty$$

En que J_0, Y_0 son las funciones de Bessel de primera y segunda clase de orden cero. u es una variable de integración.

De aquí, el flujo de calor por unidad de área del tubo al suelo es

$$q = -k \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial r} = \frac{4\theta_0 k}{R\pi^2} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{-\alpha u^2 t}}{J_0^2(uR) + Y_0^2(uR)} \right] \frac{du}{u}$$

De esta expresión se define una conductancia de la interface h , del suelo alrededor del tubo, considerando una diferencia temperatura constante θ_0 :

$$h = \frac{4k}{R\pi^2} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{-\alpha u^2 t}}{J_0^2(uR) + Y_0^2(uR)} \right] \frac{du}{u}$$

Esta conductancia, con dimensiones de un coeficiente convectivo, es análoga a este concepto, a pesar de que este caso es puramente conductivo. Añadiendo esta conductancia en serie con las otras resistencias térmicas, se puede obtener un coeficiente global de transferencia para los tubos.

Esta última ecuación muestra que h depende de la difusividad térmica, de la conductividad térmica del suelo y del radio del tubo. Además, q es decreciente en el tiempo (y por lo tanto h también).

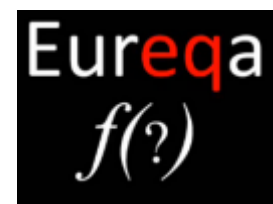
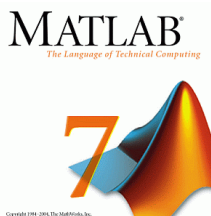
3.METODOLOGÍA

3.1. Software

1) **COMSOL Multiphysics. Versión 4.2.0.150:** Este es un software comercial de análisis y resolución por elementos finitos para variados fenómenos físicos y de ingeniería. Dado que este problema es de transferencia de calor conductivo, solo se usa el módulo “Heat Transfer”.
(<http://www.comsol.com/>)

2) **MATLAB. Versión 7.12.0.635 (R2011a):** Del desarrollador MathWorks, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con su propio lenguaje de programación (lenguaje M). Permite la manipulación de matrices, representación de datos y la creación de algoritmos. Se utilizó para ordenar y graficar los resultados de COMSOL, así como obtener promedios en el tiempo y automatizar algunas tareas.
(www.mathworks.com/products/matlab)

3) **EUREQA. Versión 0.98.2 Beta:** Creado por Cornell’s Creative Machines Lab y posteriormente comercializado por Nutonian, Inc, es una herramienta gratuita de software matemático usado para determinar ecuaciones a partir de un conjunto de datos. Se ingresan los datos al programa y se define un “objetivo”, determinando que variables serán dependientes y que operaciones matemáticas se pueden utilizar, asignando a cada operación un grado de complejidad. Al correr el programa, este busca diferentes combinaciones de operaciones usando “algoritmos genéticos”. Los resultados son muchas ecuaciones candidatas, que tienen diferente grado de ajuste a los datos y diferente complejidad (según lo valores asignados a las operaciones). Así, el usuario escoge la más adecuada según sus requerimientos. Este programa se utilizó en el trabajo para formular ecuaciones a partir de los resultados de las simulaciones.
(www.nutonian.com)



3.2. Hardware

Las simulaciones se corrieron en un computador con las siguientes características:

- Procesador: Intel® Core™ i7 CPU 950 @ 3,07 GHz
- Memoria RAM: 16 GB
- Sistema operativo: Windows 7 Profesional (64 bits)

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. Modelo en COMSOL

4.1.1. Geometría y condiciones de borde

Se usa un modelo en 2 dimensiones transiente. La tierra alrededor del tubo se modela como una región circular de diámetro a y un hueco de diámetro $2R$ en el centro que representa la pared externa del tubo (Figura 4-1).

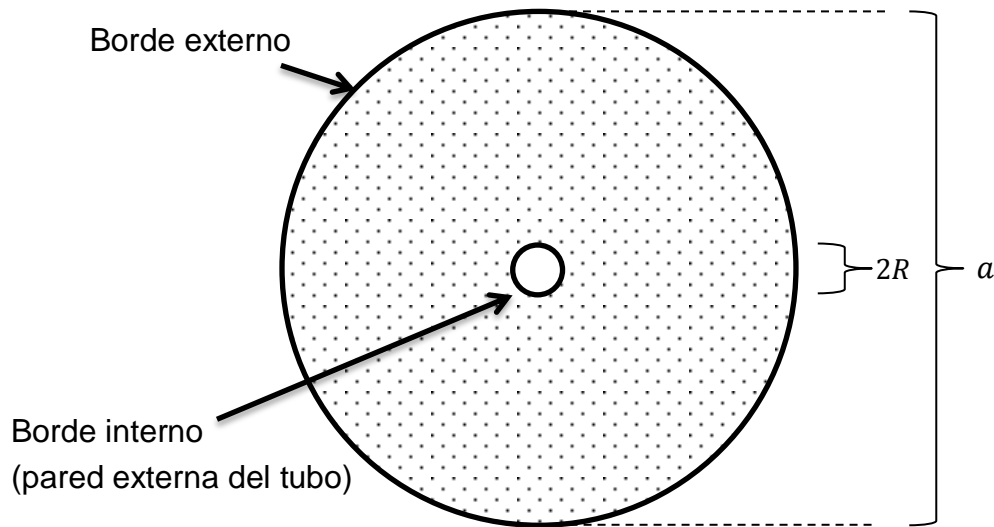


Figura 4-1: Geometría del modelo. El dominio es un círculo de diámetro a . El vacío interior es un círculo de diámetro $2R$, que representa la pared externa del tubo enterrado (dibujo no a escala).

El suelo se supone homogéneo isótropo con todas sus propiedades constantes. Inicialmente se encuentra a temperatura T_{∞} . Luego, en el tiempo cero, el borde interno (pared del tubo) se impone una temperatura T_T . En el borde externo se impone una temperatura T_{∞} para simular la reposición de energía desde lugares lejanos.

Este modelo es válido para un tubo enterrado a profundidad suficiente, de tal modo que no exista interacción con la superficie, ni exista variación vertical de temperatura en el campo no perturbado.

4.1.2. Definición de parámetros

Las simulaciones se realizan con un **horizonte temporal máximo** de 3 meses. Esto representa el mayor periodo de tiempo que se tendría funcionando de manera continua, un sistema de colección de energía con fines de climatización. En una estación, el suelo se calienta o enfría dependiendo si es invierno o verano, pero al terminar la

estación la necesidad de climatización cesa y el suelo vuelve a una temperatura normal o sin perturbación.

Para las simulaciones de este trabajo se usan los parámetros de la Tabla 4-1, a los cuales llamaremos “parámetros estándar”. En caso de no explicitar que se varía algún parámetro, se usa la configuración estándar de parámetros.

Tabla 4-1: Configuración “parámetros estándar” para simulaciones.

Temperatura Inicial, T_{∞}	287 [K]
Temperatura Tubo, T_T	297 [K]
Radio Tubo, R	2,5 [cm]
Conductividad térmica, k	1 [W/mK]
Densidad, ρ	1750 [kg/m ³]
Calor específico, c_p	1500 [W/kgK]

La **temperatura inicial** T_{∞} se configura como la temperatura media de Santiago de Chile (14 °C), que como se mencionó en la sección 2.2.1, será la temperatura media del suelo a profundidades suficientes.

La **temperatura del tubo** T_T se selecciona considerando el caso de verano, es decir, se extrae calor de la vivienda para transferirlo al suelo, por lo tanto la temperatura T_T debe ser mayor que la del suelo para que exista transferencia de calor desde el tubo hacia el suelo. Se define esta magnitud considerando que debe existir un $\Delta T = T_T - T_{\infty}$ significativo (de tal manera que exista transferencia de calor), pero moderado para que el sistema sea eficiente. Se impone una diferencia de temperatura $\Delta T = 10 [K]$, es decir $T_T = 293 [K]$.

El caso de invierno es análogo, solo que la dirección del flujo es inverso y el suelo en vez de calentarse, se enfría ($T_T = 277 [K]$). Ambos casos son problemas equivalentes, por lo cual se realizan simulaciones solo del caso de verano, sin perder generalidad en el estudio del fenómeno.

El **radio del tubo** R se selecciona de 2,5 [cm] diámetro usual en sistemas que usan bombas de calor geotérmicas.

Los parámetros del suelo: **conductividad** k , **densidad** ρ y **calor específico** c_p , se seleccionan de forma que sean representativos de un suelo típico Limo-arenoso.

4.1.3. Tamaño de la región

El tamaño de la región se debe elegir de tal modo que, el borde externo del dominio no interactúe con la distribución de temperatura alrededor del tubo. Es decir, la señal de temperatura no debe alcanzar el borde externo.

Para definir un tamaño adecuado, se realizan simulaciones variando el tamaño del dominio. Se analizan los resultados del perfil de temperatura luego de 3 meses, tiempo máximo de interés (una estación), en el cual, la señal de temperatura estará más alejada del tubo.

El **diámetro α** (Figura 4-1) del dominio se varía entre 2 [m] y 85 [m].

Se usan 2 condiciones para el borde externo:

a) Adiabático: Se usa para determinar el tamaño apropiado de la región. Como esta condición no impone una temperatura en el borde externo, se puede determinar la distancia a la cual alcanza el efecto de la temperatura del tubo (si se usa un diámetro de la región lo suficientemente grande).

b) Temperatura impuesta igual a la inicial (T_{∞}): Permite considerar la capacidad del medio de reponer energía interna. Se puede usar esta condición de borde una vez determinado el diámetro de la región por el criterio a).

Los resultados de la condición adiabática (Figura 4-2), muestran que si el tamaño de la región es insuficiente, la temperatura en el borde externo es menor que T_{∞} , lo que significa que el ΔT es menor y se subestimaría el calor transferido. Por otro lado, con la condición de temperatura impuesta (Figura 4-3), si la región no es suficientemente grande, se tiene T_{∞} a menor distancia del tubo, por lo cual se sobrestimaría el calor transferido.

Se observa que desde un radio de 12 [m] en adelante, el perfil de temperatura empieza a converger. En las figuras, solo se grafica el perfil de temperatura hasta los 8 [m] de radio, ya que en 3 meses, la señal de temperatura no llega más lejos. Un análisis más exhaustivo indica que con un dominio desde los 15 [m] en adelante, la diferencia de temperatura entre los perfiles es menor que 0,01 [K] y las soluciones con una región aun mayor, convergen con mucha precisión a la misma curva.

Además, al tener regiones suficientemente grandes, ambas configuraciones de borde externo (adiabático y temperatura impuesta) convergen a la misma solución, hecho que confirma la no influencia del borde sobre la señal de temperatura.

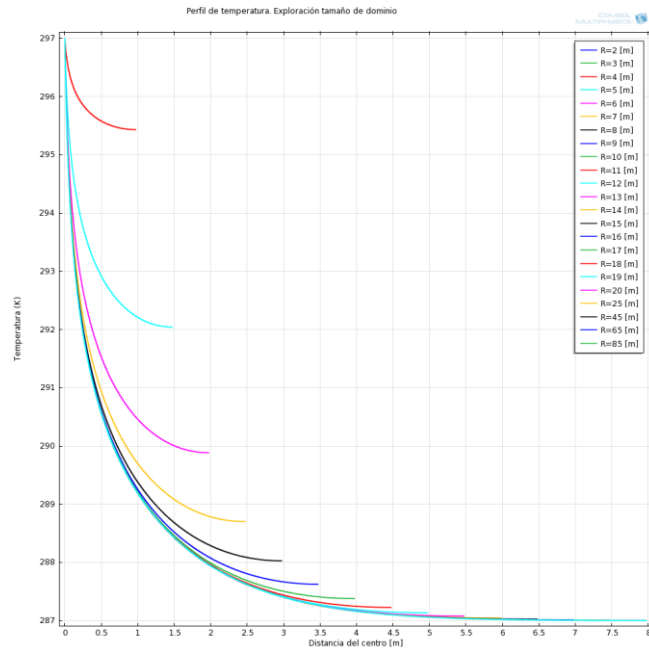


Figura 4-2: Perfis de temperatura para diferentes tamanhos de região. Borde adiabático.

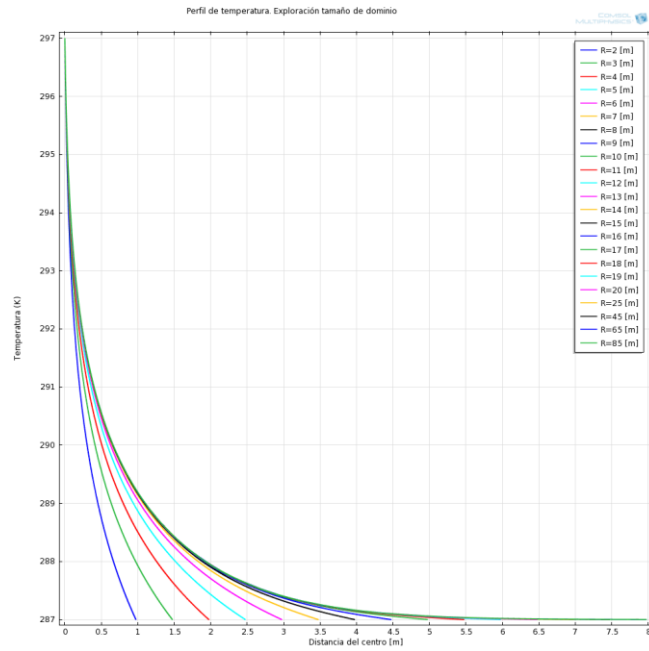


Figura 4-3: Perfis de temperatura para diferentes tamanhos de região. Borde con temperatura impuesta T_{∞} .

Luego de este análisis, el diámetro del dominio se elige de 40 [m]. De este modo el borde de la región no tiene ninguna influencia sobre las soluciones.

4.1.4. Mallado

El software COMSOL propone mallas apropiadas acordes a la ecuación que se está resolviendo y a las condiciones de borde del problema. En este caso genera una malla mucho más fina alrededor del tubo, para así tener una resolución adecuada en la zona de mayor gradiente de temperatura y no despreciar su efecto.

Para la selección de un mallado adecuado para realizar las simulaciones, se generan diferentes mallas con variados número de elementos desde 402 hasta 31012 elementos (Figura 4-4: Mallas más gruesa de 402 elementos (izquierda) y más fina explorada de 31012 elementos (derecha). El recuadro inferior derecho de cada imagen muestra un acercamiento del mallado alrededor del tubo. Figura 4-4).

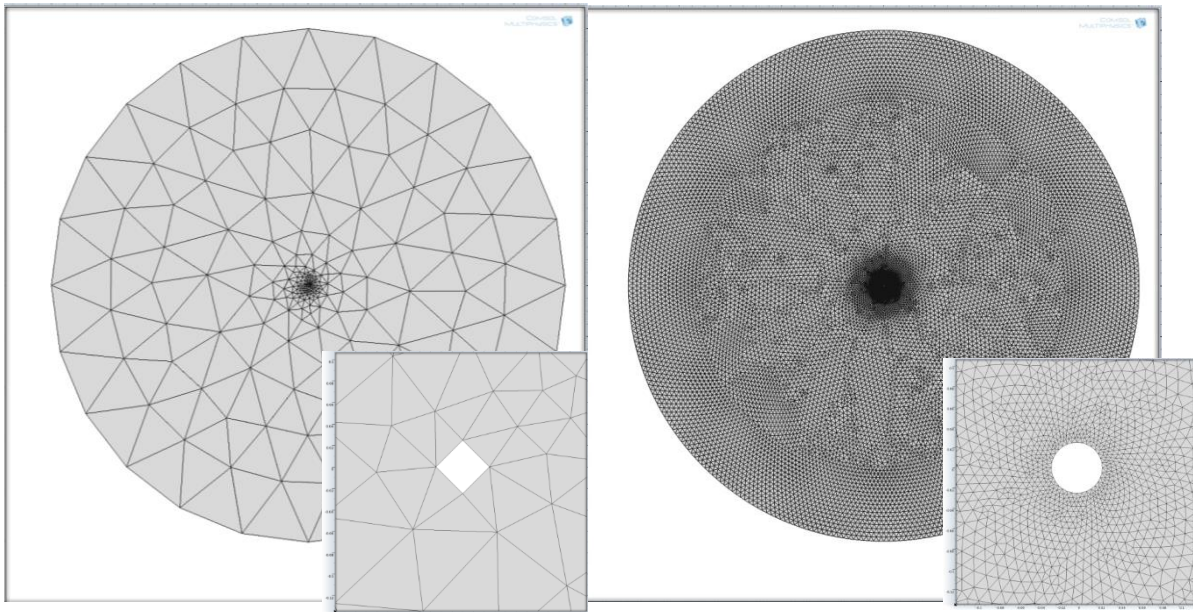


Figura 4-4: Mallas más gruesa de 402 elementos (izquierda) y más fina explorada de 31012 elementos (derecha). El recuadro inferior derecho de cada imagen muestra un acercamiento del mallado alrededor del tubo.

La malla más gruesa no reproduce correctamente la geometría del tubo, ya que la aproxima a un cuadrado.

Se exploran los valores de la magnitud de calor transferido desde el tubo a la tierra (W/m^2) en función del tiempo para diferentes mallas. A medida que la malla se hace más fina, la solución converge a una solución única (Figura 4-5).

. En la Figura 4-6 se muestra el calor transferido del tubo al suelo para el día 1, día 7, día 42 y día 70 en función del número de elementos. Se aprecia que desde la malla “Normal” (según la terminología de COMSOL) con 1930 elementos en adelante, la solución no varía significativamente.

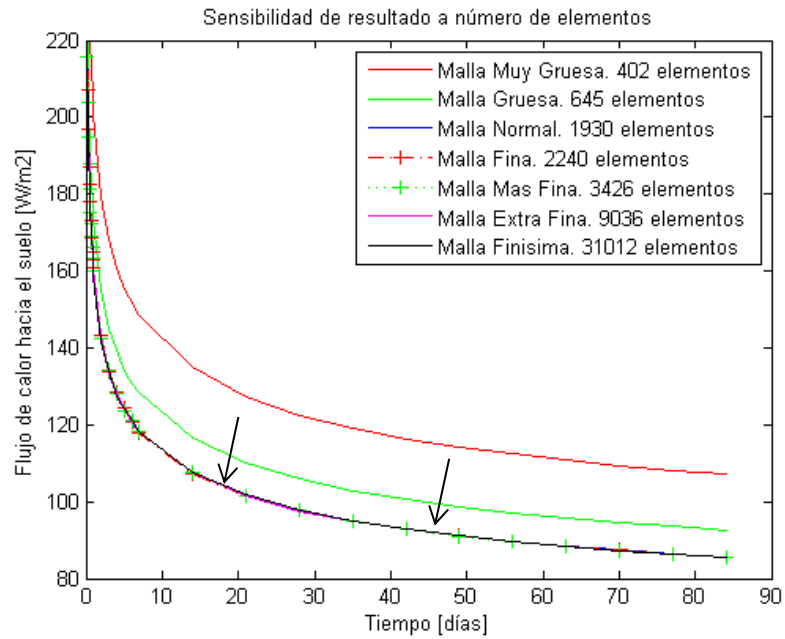


Figura 4-5: Calor transferido del tubo al suelo. Al refinar la malla, la curva tiende a una solución única.

Generalmente, para ahorrar tiempo computacional, se usa la malla más gruesa con que se puede obtener resultados independientes de la mala. Sin embargo, como se trata de un sistema lineal las soluciones son muy rápidas, esta restricción es irrelevante, por lo cual para las simulaciones posteriores se realizan con mallas “Finísimas”.

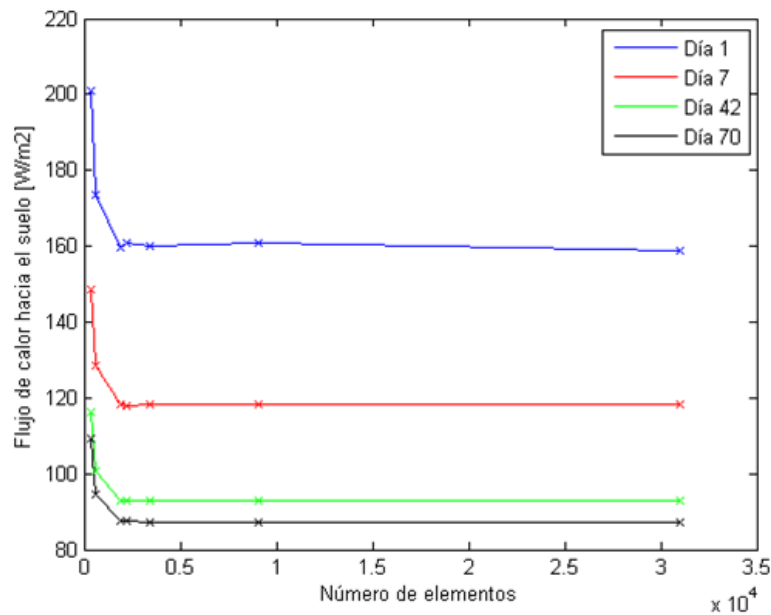


Figura 4-6: Calor transferido del tubo a la tierra en diferentes instantes en función de la cantidad de elementos de la malla.

4.2. Perfil de temperatura para tubo único

En la Figura 4-7 se muestra la evolución del perfil de temperatura en el tiempo. Las curvas corresponden al final de cada semana. Se usan los “parámetros estándar” (Tabla 4-1).

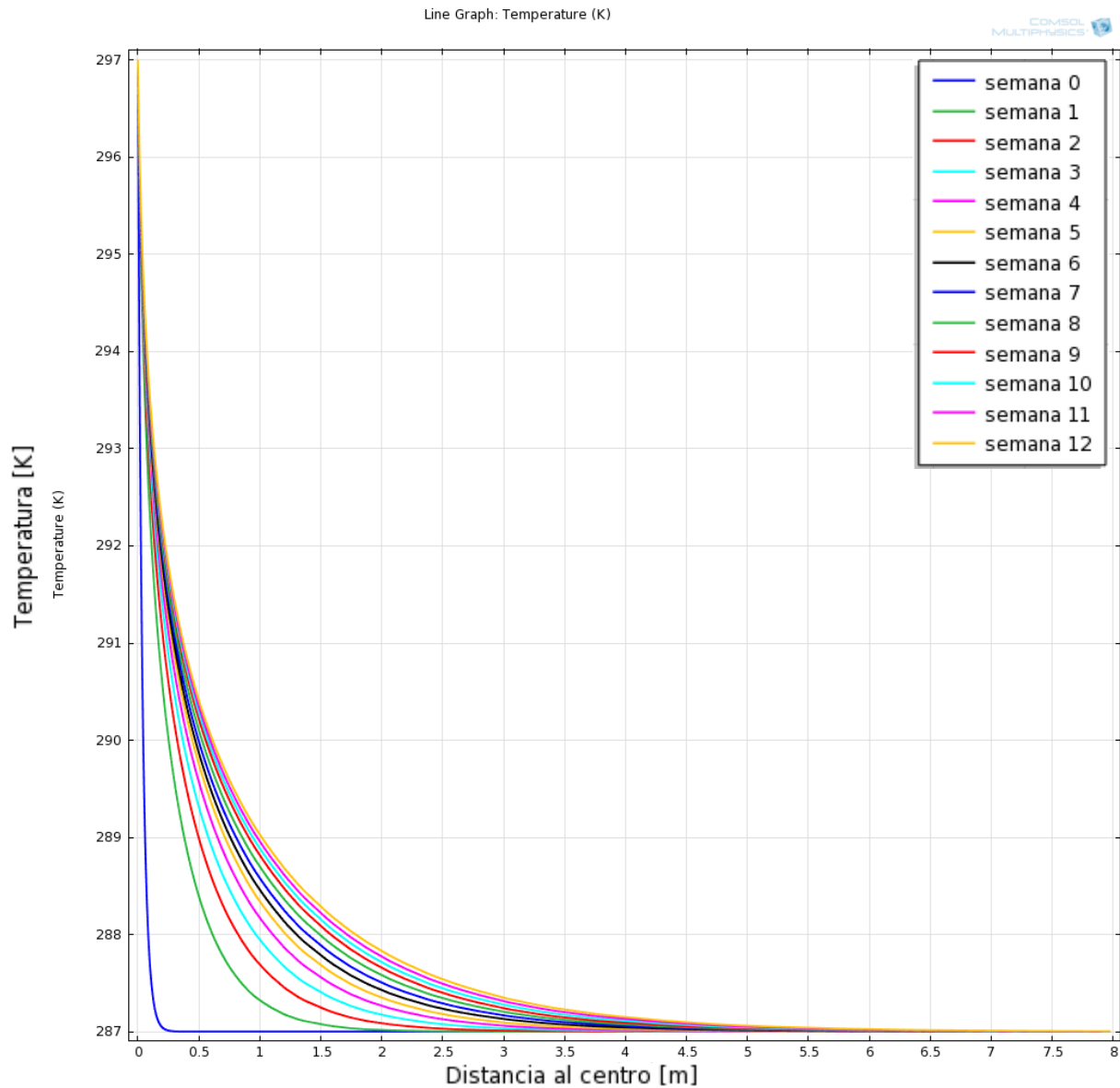


Figura 4-7: Perfil de temperatura en distintos instantes de tiempo.

En la Figura 4-8 se grafican las isotermas para el mismo caso que el presentado en la Figura 4-7. Se observa que el efecto del tubo caliente se propaga radialmente y las zonas cercanas al tubo aumentan su temperatura considerablemente.

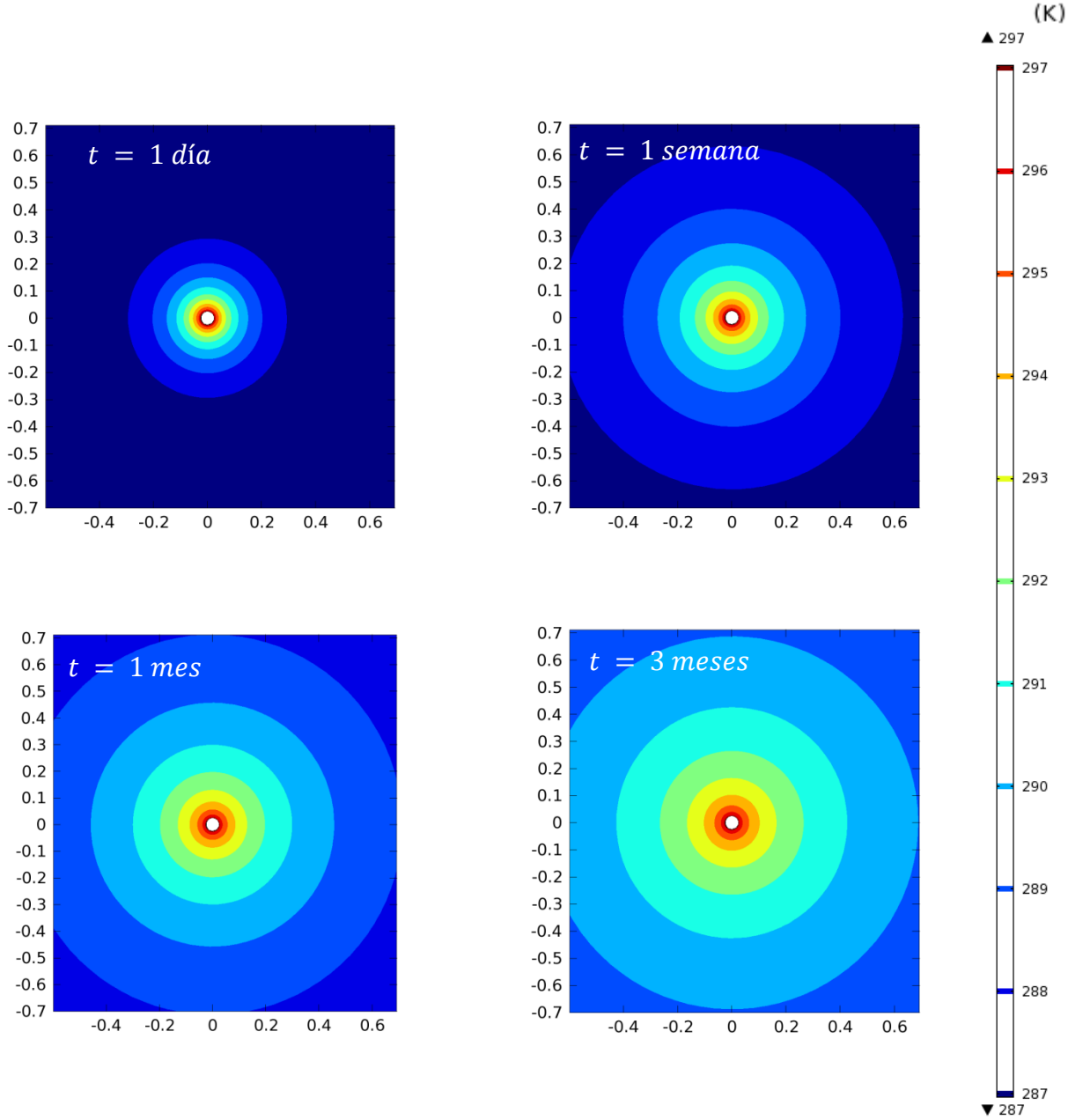


Figura 4-8: Perfiles de temperatura alrededor de un tubo en diferentes instantes.

4.3. Flujo de calor del tubo al suelo

En los primeros minutos, el flujo de calor desde el tubo hacia el suelo es muy alto (~ 450 $[\text{W}/\text{m}^2]$), pero debido a la modificación de la temperatura del suelo, se reduce el gradiente térmico alrededor de los tubos. Esto produce que el flujo de calor disminuya de forma vertiginosa durante el primer día, y luego continúe disminuyendo de forma cada vez más lenta (Figura 4-9 y Tabla 4-2). Alrededor del día 15 en adelante, el flujo se estabiliza con una pendiente muy pequeña de alrededor de $-0,23$ $[\text{W}/\text{m}^2/\text{día}]$.

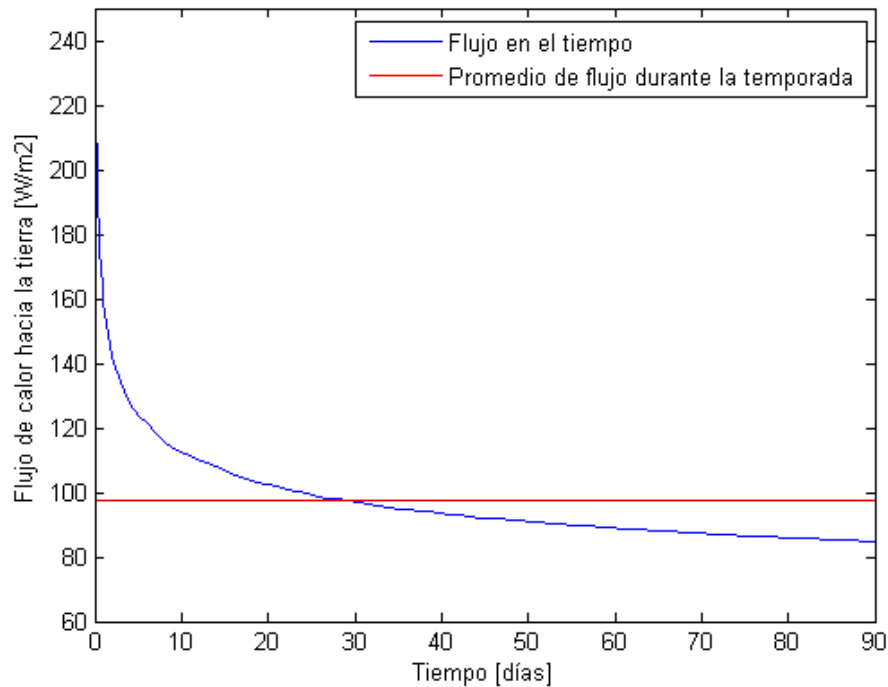


Figura 4-9: Flujo de calor hacia la tierra en el tiempo.

Tabla 4-2: Calor transferido desde el tubo hacia la tierra en diferentes instantes de tiempo.

Tiempo	Calor $[\text{W}/\text{m}^2]$
10 minutos	443
1 hora	352
12 horas	177
1 día	159
3 días	134
1 semana	118
1 mes	97
2 meses	89
3 meses	85

Ya que el calor transferido a través de la pared del tubo varía en el tiempo, se configura COMSOL de tal modo que, almacene soluciones en los instantes que permitan una representación adecuada de la curva de calor en función del tiempo y no se sobre cargue de resultados innecesarios. Es por esta razón que los resultados obtenidos no están equiespaciados en el tiempo. Con un pequeño código de MATLAB se promedia el calor trasferido durante los 3 meses. Este promedio definido como:

$$\bar{q} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} q dt$$

se obtiene discretizando la integral, es decir, se calcula la suma de Riemann por la izquierda y por la derecha

$$S_{izq} = \sum_{i=1}^{n-1} q(t_i)(t_{i+1} - t_i) \quad S_{der} = \sum_{i=1}^{n-1} q(t_{i+1})(t_{i+1} - t_i)$$

luego se promedian ambas sumas y se divide por Δt

$$\bar{q} = \frac{(S_{izq} + S_{der})}{2} \frac{1}{\Delta t}$$

De esta manera se obtiene el promedio del flujo de calor en el tiempo ponderando cada resultado con el peso que le corresponde.

Usando este promedio de flujo de calor durante la temporada, se cuantifican y comparan objetivamente los resultados de la capacidad de intercambio térmico de un tubo, permitiendo estudiar esta capacidad de intercambio, en función de otras variables de interés (propiedades del suelo, diámetro del tubo, horizonte de tiempo).

Al final de la temporada el flujo de calor es 15% menor que el promedio.

4.4. Influencia de variables de interés en el flujo de calor

Se busca el promedio en el tiempo del flujo de calor, en función de diferentes variables de interés. Para esto se usa la herramienta “Parameter Sweep” de COMSOL, la cual permite realizar varias simulaciones seguidas, pero cambiando la magnitud de diferentes parámetros según se requiera. En total se realizaron 82 simulaciones para este objetivo.

4.4.1. Rangos de variables

Se explora la influencia de:

➤ Condiciones térmicas:

- **Diferencia de temperatura, ΔT :**
 - Rango: 0,5 – 14,5 [K].
 - Paso: 1 [K]

Se realiza un barrido de la diferencia de temperatura, haciendo variar la temperatura del tubo T_T y dejando fija la temperatura inicial del suelo T_∞ .

➤ Propiedades físicas:

- **Conductividad térmica del suelo, k :**
 - Rango: 0,2 – 5 [W/mK].
 - Paso 0,3 [W/mK]

Basado en la información recopilada, el suelo presenta conductividades entre 0,2 [W/mK] (turba seca) y 5 [W/mK] (arena saturada de agua). Conductividades típicas rodean los 1,0 - 1,7 [W/mK].

- **Capacidad calorífica volumétrica, C_v :**
 - Rango: 150.000 – 4.050.000 [J/m³K].
 - Paso: 300.000 [J/m³K].

Es importante comentar que en las simulaciones del software COMSOL, solo se puede modificar o tener control sobre:

- Conductividad térmica, k
- Densidad del suelo, ρ
- Calor específico, c_p

Entonces, para modificar la capacidad calorífica volumétrica:

$$C_v = \rho c_p$$

se debe modificar ρ y/o c_v que son variables sobre las cuales, sí se tiene control. Se definen las variables auxiliares:

$$X = \frac{C_v}{C_v^e}$$

$$Y = \sqrt[2]{X}$$

donde $C_v^e = \rho^e c_p^e = 2.625.000 [J/m^3K]$ es la capacidad calorífica volumétrica estándar (el superíndice e denota “propiedades estándar”, ver sección 4.1.2). La densidad y el calor específico quedan en función de la variable Y :

$$\begin{aligned}\rho &= Y\rho^e \\ c_p &= Yc_p^e\end{aligned}$$

Así, al hacer variar C_v en el rango de interés, ρ y c_p varían en la misma proporción.

➤ Geometría y horizonte de tiempo:

- **Radio del tubo, R :**
 - Rango: 1,5 – 24 [cm].
 - Paso: 1 [cm].

Se elige este rango para abarcar tubos usados en bombas de calor geotérmicas, cuyo diámetro típico es de alrededor de 5 [cm] y también en intercambiadores de calor aire-tierra, cuyos diámetros típicos son desde 20 [cm] hasta 50 [cm].

- **Horizonte temporal, Δt :**
 - Rango 14 – 91 [días].
 - Paso: 7 [días].

4.4.2. Diferencia de temperatura

Tal como se indica en la ecuación (2) de la página 11, se observa en la Figura 4-10 una proporcionalidad directa entre el promedio de calor y la diferencia de temperatura, por lo cual, es sensato expresar el promedio de calor durante la temporada como el producto entre una conductancia h y la diferencia de temperatura ΔT :

$$\bar{q} = h\Delta T$$

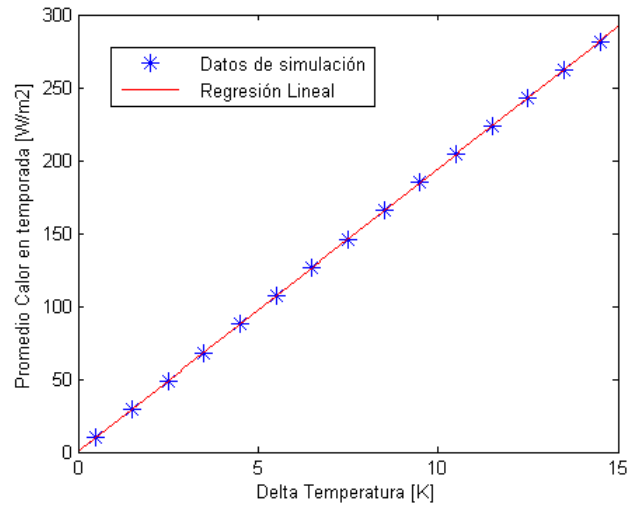


Figura 4-10: El promedio de calor transferido durante la temporada es directamente proporcional con la diferencia de temperatura.

4.4.3. Conductividad térmica del suelo

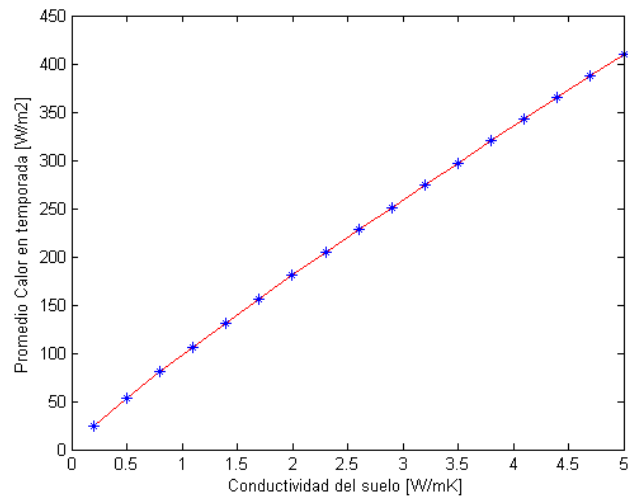


Figura 4-11: Promedio de calor transferido durante la temporada en función de la conductividad térmica del suelo.

El gráfico (Figura 4-11) muestra una con un comportamiento casi lineal. Se observa una concordancia clara con la solución analítica, que establece una relación de proporcionalidad directa, modificada por la presencia de k en la exponente negativa dentro de la integral.

4.4.4. Calor específico volumétrico

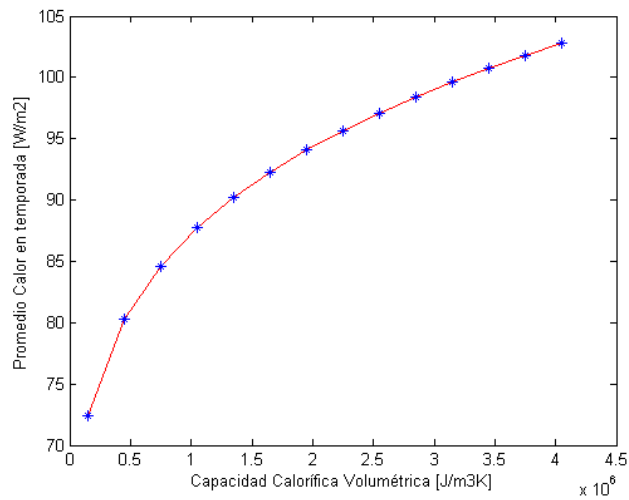


Figura 4-12: Promedio de calor transferido durante la temporada en función de C_v .

La dependencia del calor en función del calor específico volumétrico es débil (Figura 4-12). Al aumentar 27 veces C_v , el aumento de la capacidad de transferencia de los tubos es solo un 42%.

4.4.5. Radio del tubo

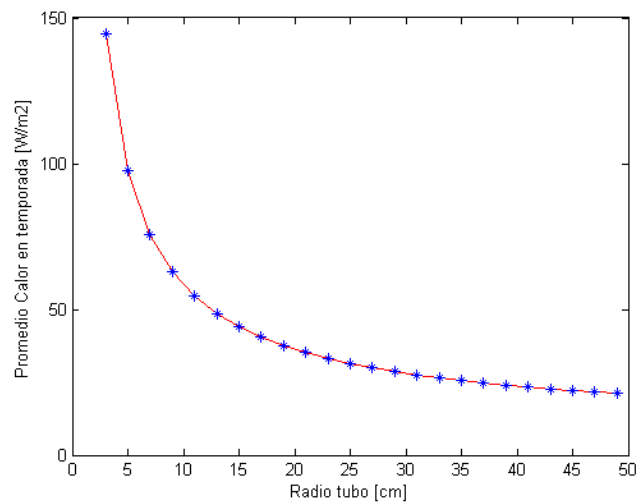


Figura 4-13: Promedio de calor transferido durante la temporada en función del radio del tubo.

Se observa una dependencia inversamente proporcional acorde con lo pronosticado en la solución analítica (Figura 4-13).

4.4.6. Horizonte temporal

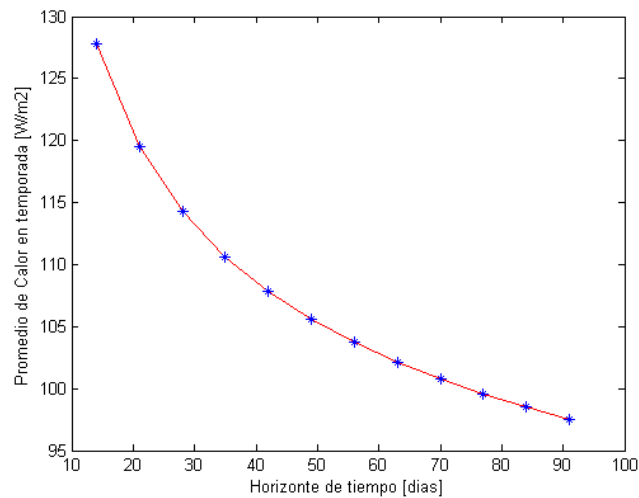


Figura 4-14: Promedio de calor transferido durante la temporada, en función del horizonte temporal de funcionamiento continuo del tubo de colección de energía.

El promedio de calor decae lentamente a medida que se aumenta el horizonte temporal, ya que al abarcar más días, la capacidad de transferencia va disminuyendo como se muestra en la Figura 4-9.

4.4.7. Factores que influyen en la conductancia

Usando el software Eureka, se busca una fórmula para el promedio de calor en la temporada, $\bar{q}(k, \frac{k}{C_v}, R, \Delta t)$ en función de:

- Conductividad térmica, k
- Difusividad térmica, $\alpha = \frac{k}{C_v}$
- Radio del tubo, R
- Horizonte temporal, Δt

Se busca un modelo que incorpore $\alpha = \frac{k}{C_v}$ como variable independiente, pero a partir de los resultados de las simulaciones que se pueden parametrizar solo por k y por C_v . Esta forma indirecta de incorporar la difusividad térmica como variable independiente, se elige para que la fórmula posea más significado físico, en comparación a si se eligiera C_v como variable independiente.

El software Eureka entrega variadas fórmulas con distinto grado de precisión y complejidad. De entre los candidatos se selecciona la siguiente

$$\bar{q} = \frac{68,89 \cdot k \cdot \Delta t^{0,14}}{R^{0,696} \cdot \alpha^{0,109}}$$

En que:

- \bar{q} está en $\frac{W}{m^2}$
- k está en $\frac{W}{mk}$
- Δt está en **días**
- R está en **cm**
- $\alpha = \frac{k}{c_v}$ está en $\frac{m^2}{s}$

Se logra un buen grado de aproximación y la fórmula es sencilla.

Luego, se busca establecer una conductancia $\bar{h}(k, \frac{k}{c_v}, R, \Delta t, \Delta T)$ del suelo alrededor del tubo.

En la Figura 4-15, se grafica el error en \bar{q} en función de cada una de las variables de las cuales depende.

El ajuste corresponde con suficiente precisión a los datos. Para la conductividad térmica, el calor específico volumétrico y el horizonte de tiempo se tienen errores bien pequeños, que difícilmente superan el 2% de error. Al variar el radio del tubo, la fórmula se ajusta con menos precisión, con errores máximos que superan el 6%. De todas formas, esta fórmula permite una evaluación rápida con un nivel de precisión aceptable para el promedio de la capacidad de transferir calor en la temporada.

Dado que el promedio de calor en la temporada \bar{q} , tiene una relación directamente proporcional con la diferencia de temperatura (sección 4.4.2), se define la conductancia promedio \bar{h}

$$\bar{h} = \frac{6,889 \cdot k \cdot \Delta t^{0,14}}{R^{0,696} \cdot \alpha^{0,109}}$$

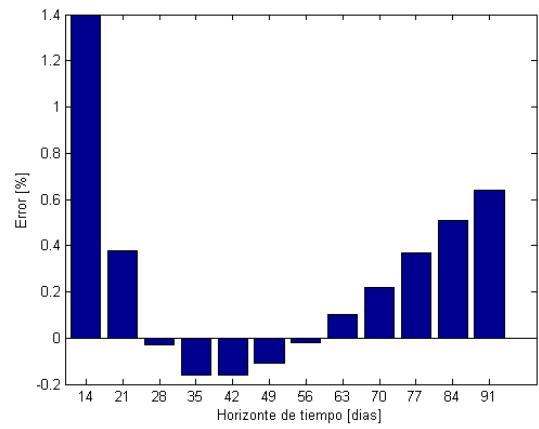
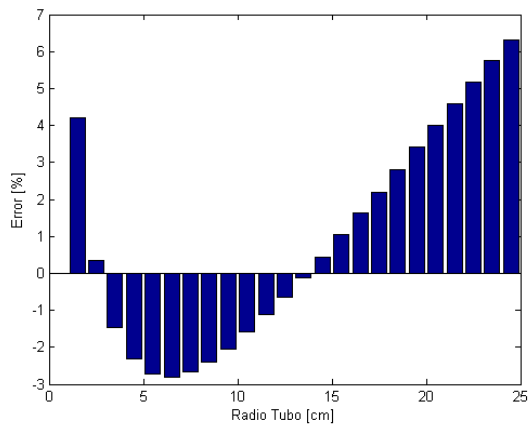
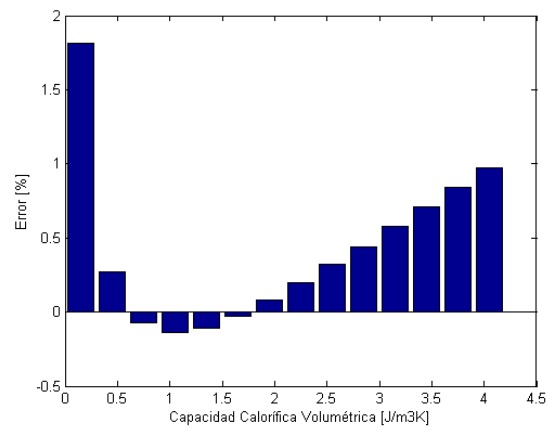
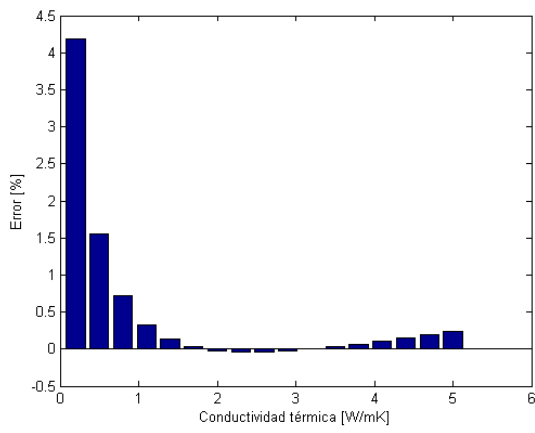


Figura 4-15: Error porcentual entre el ajuste propuesto y los datos de las simulaciones.

4.5. Interferencia térmica en arreglos de tubos

Se estudia la interferencia térmica en arreglos de 2 y 3 tubos paralelos horizontales.

En el software COMSOL, se dibujan los tubos adicionales del mismo radio **R** a una distancia **S** entre centros. En Figura 4-16 se muestra el caso de 2 tubos.

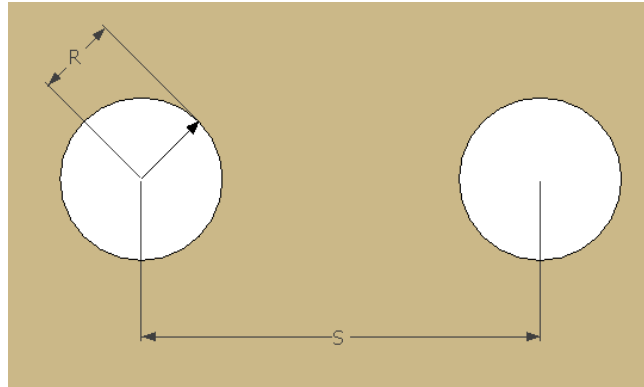


Figura 4-16: Acercamiento en la zona de los tubos. La separación **S** se define entre centros.

Con las simulaciones, se busca el campo de temperatura alrededor de los tubos y el campo de magnitud del flujo de calor conductivo.

También, se calcula el promedio en el tiempo de la magnitud del calor transferido desde el tubo hacia el suelo. Para cuantificar la disminución de capacidad de transferencia debido a la interacción térmica entre los tubos, se comparan los resultados de arreglos de tubos, con los de simulaciones en las cuales solo se tiene un tubo (es decir, sin interferencia). El efecto de la interferencia térmica, se cuantifica mediante el parámetro “porcentaje de interferencia” $\%I$. Éste, indica cual es la capacidad de transferencia de un tubo (influenciado por otros cercanos), considerando como 100% la capacidad de transferencia sin interferencia térmica.

$$\%I = \frac{Q_N}{Q_1 \cdot N} \cdot 100(\%)$$

Q_N : Transferencia de calor total en un arreglo de N tubos.

Q_1 : Transferencia de calor de un tubo sin interferencia térmica.

N : Número de tubos

Se realizan diferentes simulaciones, haciendo variar el distanciamiento **S** entre 20 y 200 [cm] y el radio de los tubos **R** entre 1,5 y 23 [cm].

4.5.1. Perfil de temperatura en arreglos de 2 tubos

En la Figura 4-17, se muestra el perfil de temperatura de 2 tubos de 2,5 [cm] de diámetro y separados 50 [cm] a lo largo de la línea perpendicular a ambos tubos (línea roja en el dibujo de referencia). La temperatura del suelo en la zona entre los tubos aumenta con gran velocidad, disminuyendo de este modo, la transferencia de calor de los tubos hacia el suelo en esa dirección. Hacia los lados se obtienen curvas muy similares a las de tubo único (Figura 4-7).

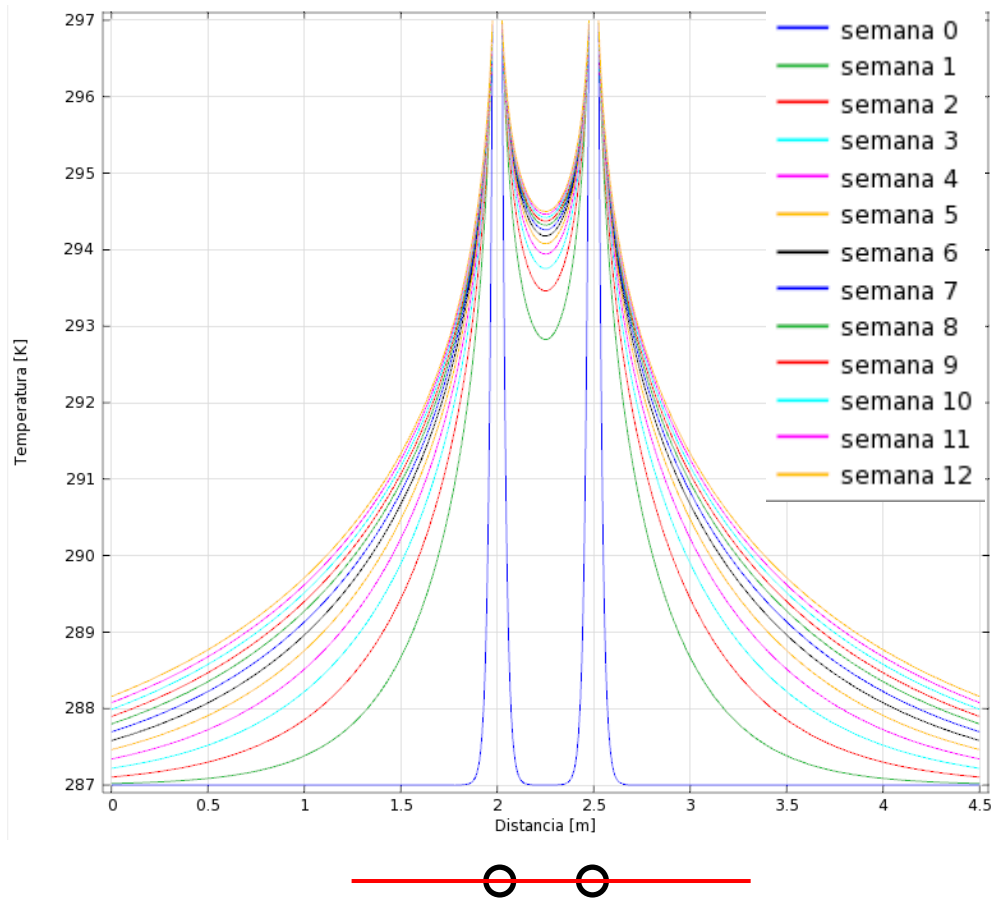


Figura 4-17: Perfil de temperatura a lo largo de la línea perpendicular a ambos tubos en distintos instantes de tiempo.

En la Figura 4-18 se muestra como evolucionan las isotermas, generándose un gradiente de temperatura menor en la dirección entre los tubos.

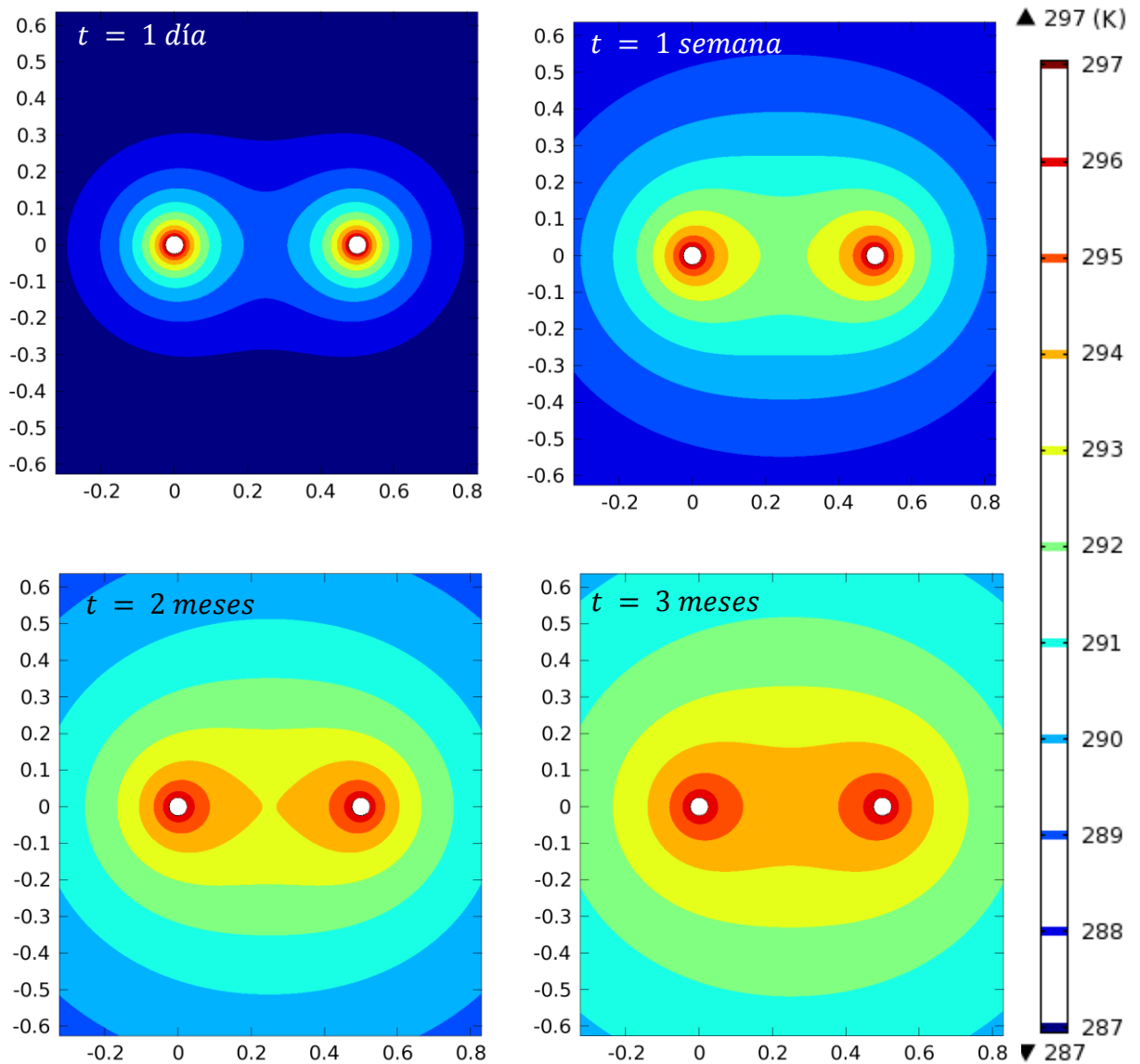


Figura 4-18: Isotermas alrededor de dos tubos en diferentes instantes de tiempo. La escala de la regla se muestra en metros.

4.5.2. Flujo de calor en arreglo de 2 tubos

En la Figura 4-19 se muestra la magnitud del flujo de calor conductivo. Como es de esperar, el flujo disminuye a medida que nos alejamos de los tubos, ya que el calor se distribuye en mayor área. Sin embargo, no hay mucho flujo de calor en la zona entre los tubos, siendo este fenómeno el que resulta de la interferencia térmica entre los tubos.

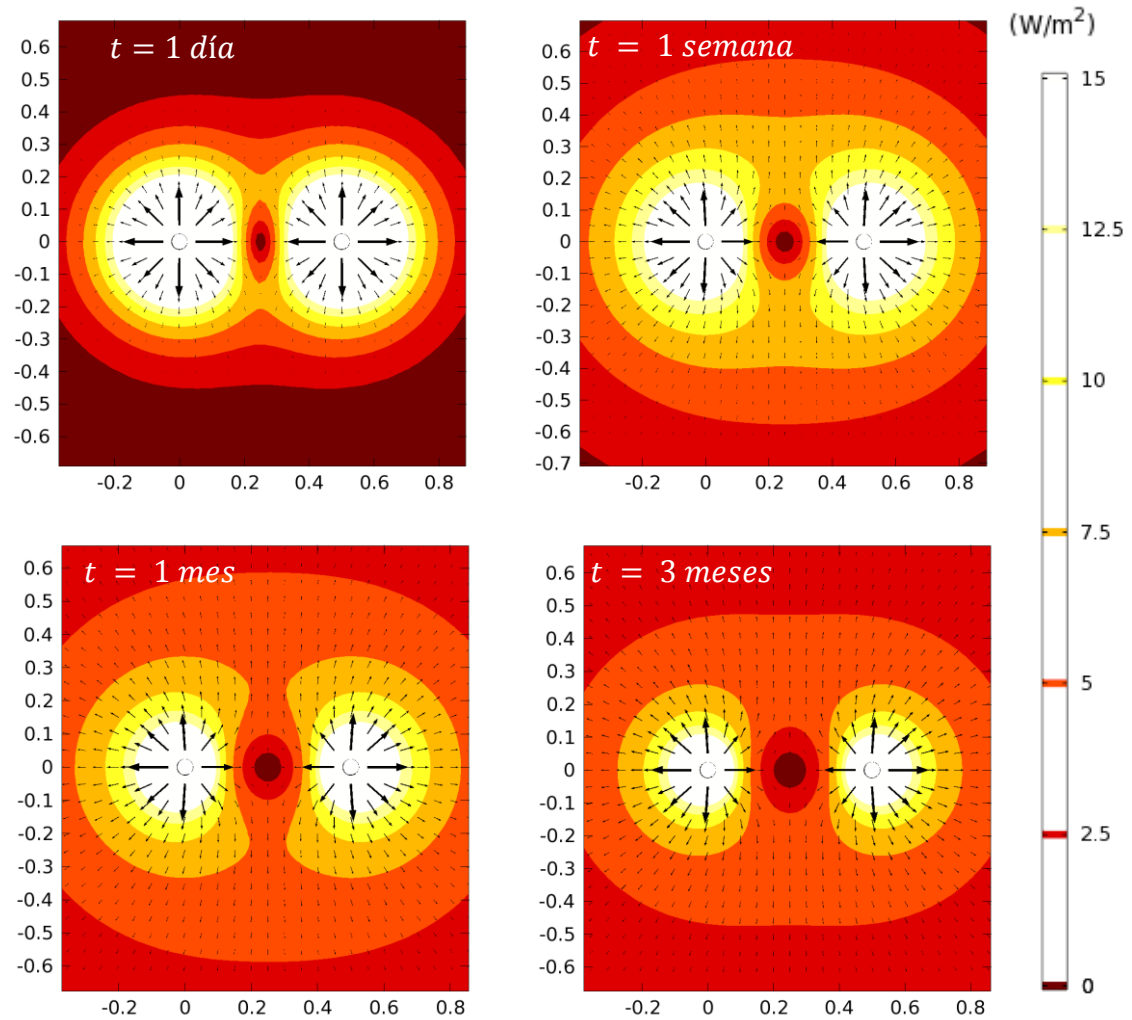


Figura 4-19: Magnitud de flujo de calor conductivo. La zona blanca muestra flujo de $15 \text{ [W/m}^2\text{]}$ o mayores. La escala de la regla se muestra en metros.

4.5.3. Porcentaje de interferencia en arreglo de 2 tubos

En la Figura 4-20 se muestran los resultados de las simulaciones de interferencia térmica entre 2 tubos. Ésta disminuye a medida que la separación aumenta. Incluso con una separación considerable de 2 [m], la capacidad de transferir calor por cada uno de los tubos disminuye alrededor de un 5% en relación a su capacidad máxima. Los resultados indican que la interferencia térmica es mayor si los tubos tienen mayor radio.

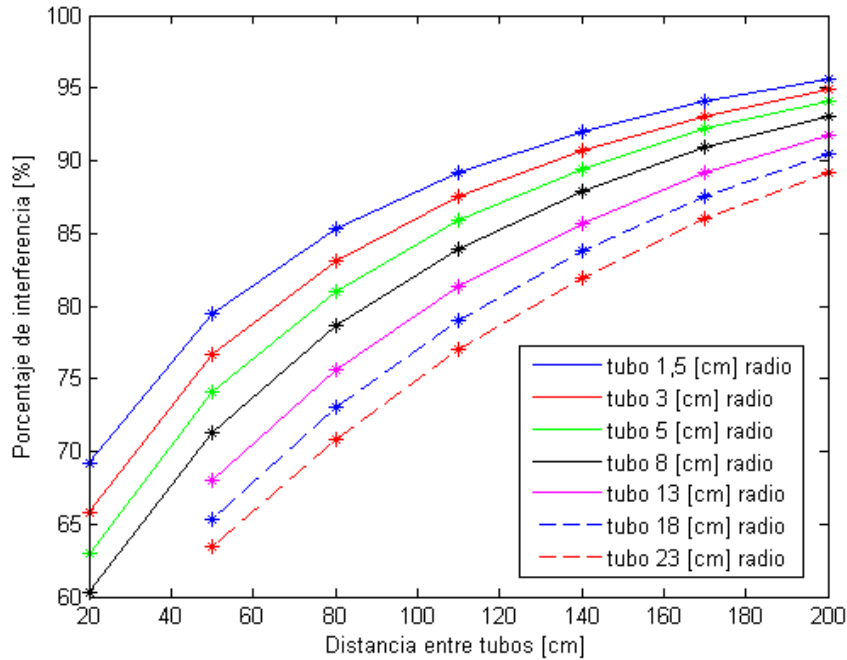


Figura 4-20: Porcentaje de interferencia de 2 tubos paralelos.

Se busca una fórmula para la interferencia térmica entre 2 tubos, con la separación y el radio de los tubos como variables independientes $%I(S, R)$. De las fórmulas propuestas por el software Eureka, se selecciona

$$%I = \frac{3301 + 109,8 \cdot S}{63,19 + R + S}$$

Donde S está en [cm] y R está [cm].

Esta fórmula representa con buena precisión los resultados de las simulaciones y es sencilla a la hora de evaluar. El valor absoluto de la diferencia entre los valores predichos por la fórmula y los datos de las simulaciones, (salvo un par de conjunto de datos) no superan el 2% de error absoluto (Figura 4-21).

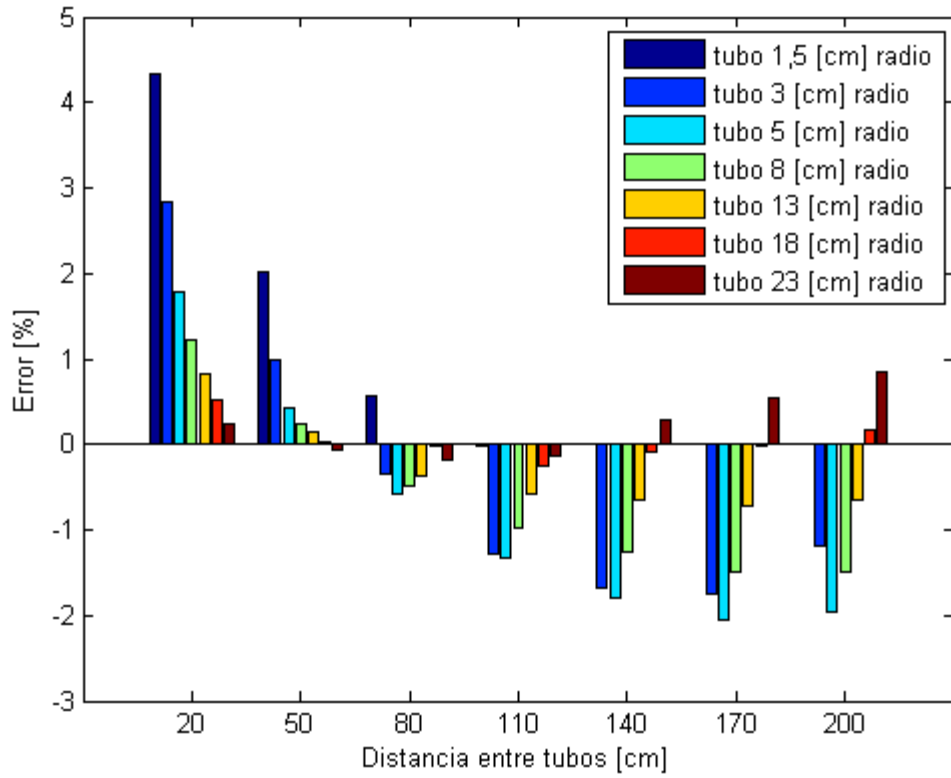


Figura 4-21: Error porcentual entre ajuste propuesto y datos de las simulaciones para interferencia entre 2 tubos.

4.5.4. Perfil de temperatura en arreglo de 3 tubos

El perfil de temperatura, a lo largo de la línea perpendicular a los 3 tubos se muestra en la Figura 4-22. Los tubos tienen 2,5 [cm] de radio y están separados 50 [cm] entre ellos.

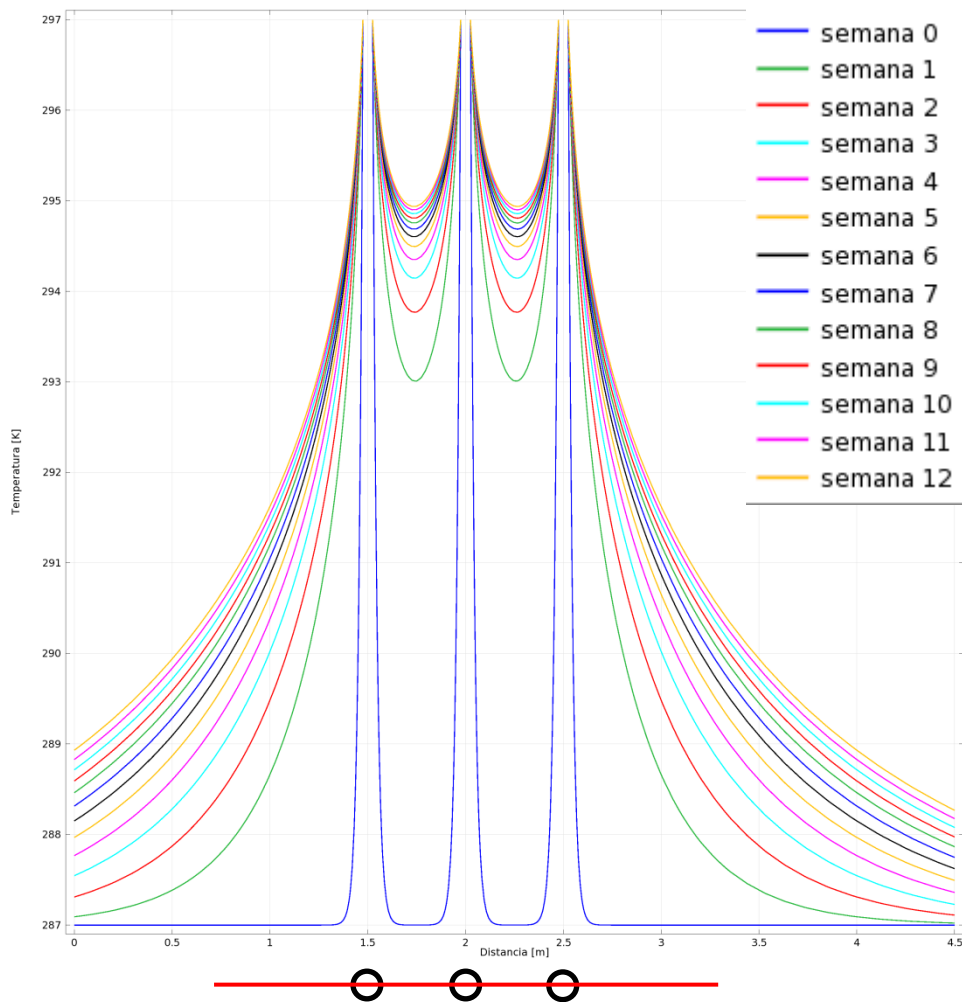


Figura 4-22: Perfil de temperatura a lo largo de la línea perpendicular a los 3 tubos en distintos instantes de tiempo.

Las zonas entre los tubos aumentan de temperatura de forma muy rápida y similar al observado en el perfil de 2 tubos (Figura 4-17). Sin embargo, un análisis un poco más detallado muestra que estas zonas se calientan aún más rápido y la temperatura máxima que alcanza entre los tubos también es mayor. En la Figura 4-23 se muestran las isotermas alrededor de los tubos. Estas muestran que alrededor del tubo central, el gradiente de temperatura es menor en la dirección perpendicular a los 3 tubos. Además, avanzada la temporada, el gradiente de temperatura hacia arriba y abajo es más pequeño en el tubo central que en los tubos laterales.

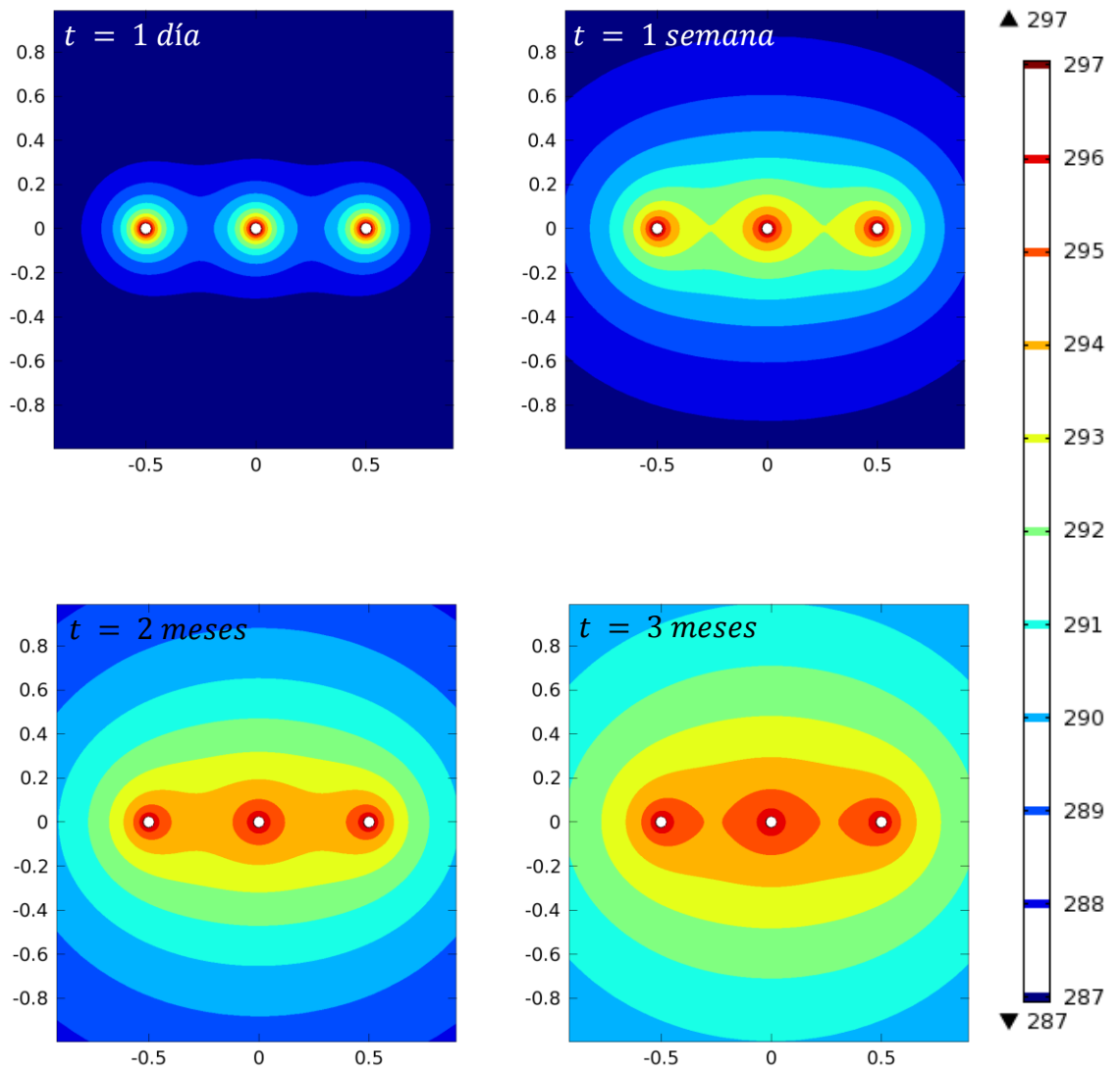


Figura 4-23: Isothermas alrededor de 3 tubos paralelos en diferentes instantes de tiempo.

4.5.5. Flujo de calor en arreglo de 3 tubos

En la Figura 4-24, se muestra el campo de flujo de calor conductivo alrededor de los tubos. Se aprecia claramente cómo se genera una zona que transporta menos calor entre los tubos. Se aprecia también, como el tubo central ve reducida su capacidad de transferencia de calor debido a los tubos vecinos.

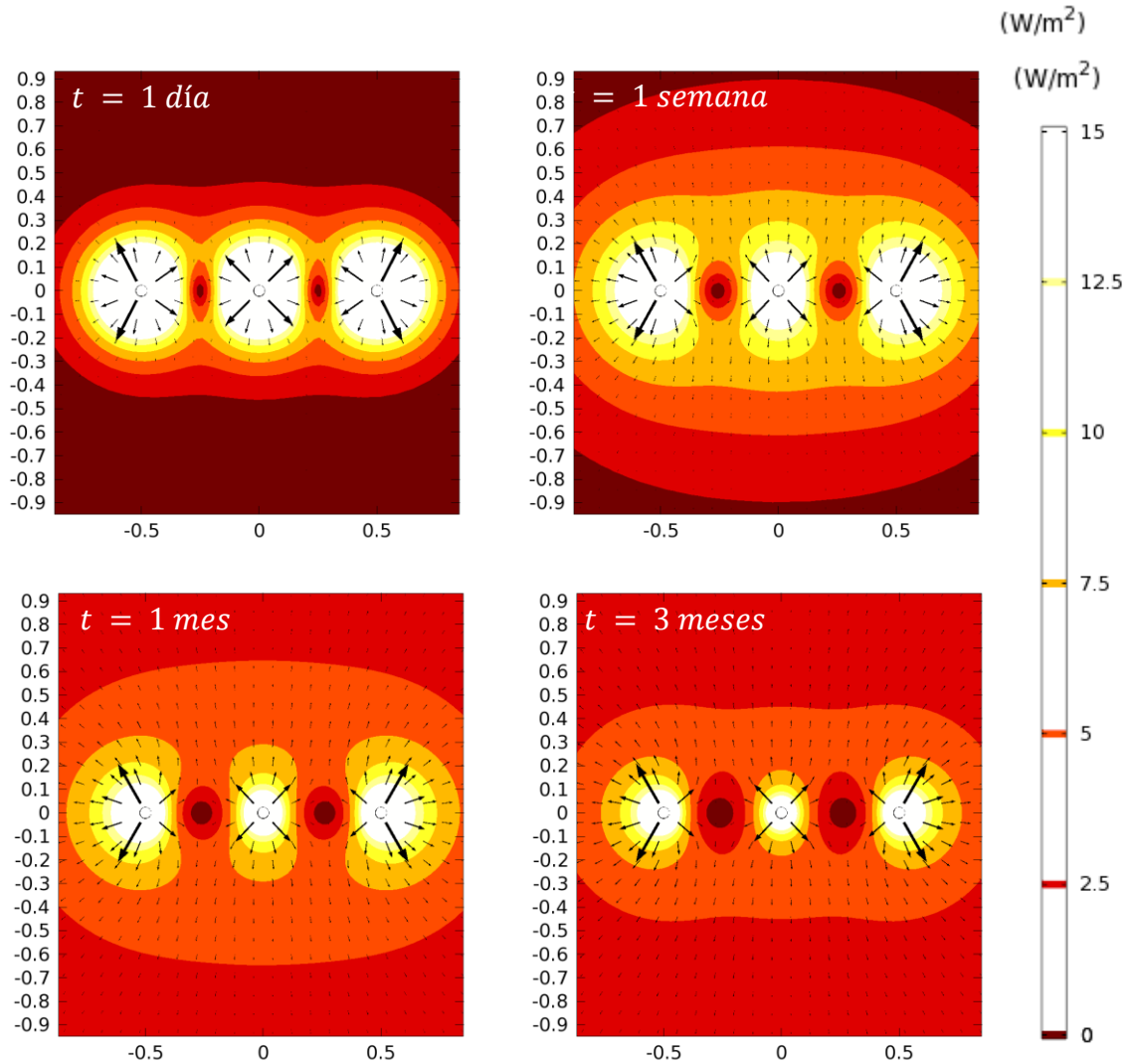


Figura 4-24: Magnitud de flujo de calor conductivo.

4.5.6. Porcentaje de interferencia térmica en arreglos de 3 tubos

En la Figura 4-25 se muestran los resultados de las simulaciones para la interferencia térmica en arreglos de 3 tubos. Se observa un comportamiento casi idéntico a la interferencia entre 2 tubos (Figura 4-20), pero con las curvas desplazadas un poco hacia abajo

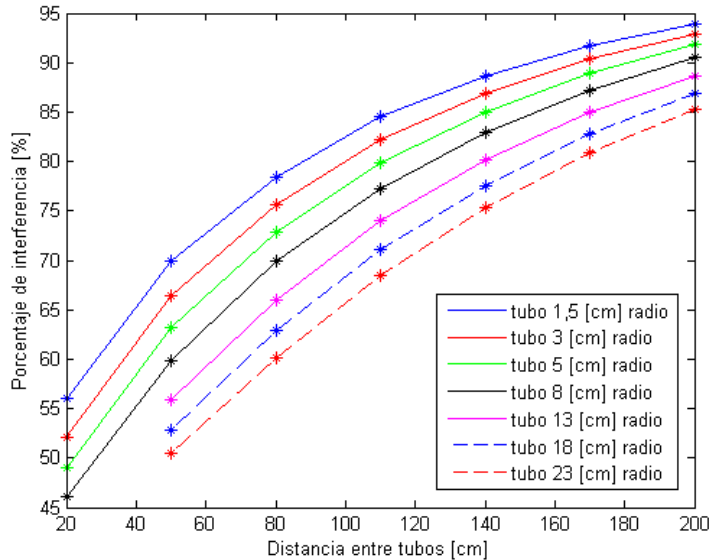


Figura 4-25: Porcentaje de interferencia de 3 tubos paralelos

Para comparar la interferencia entre 2 y 3 tubos, se grafica la diferencia en la Figura 4-26. Ésta, muestra que agregar un tubo adicional, la disminución de transferencia de calor es más significativa, mientras menor sea la separación entre tubos o el radio de los tubos sea mayor. A distancias muy grandes, la interferencia entre tubos se debilita y los tubos transfieren calor casi como si fueran independientes.

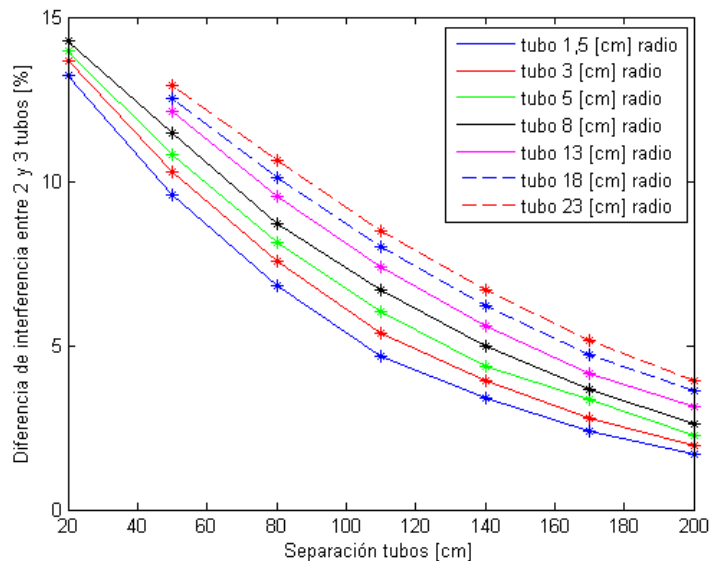
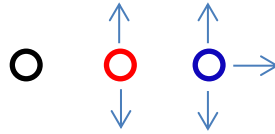


Figura 4-26: Diferencia de porcentaje de interferencia entre 2 y 3 tubos.

4.5.7. Comparación tubos laterales con tubos centrales en arreglos de 3 tubos

Se compara la transferencia de calor entre los tubos laterales (azul) y el tubo central (rojo).



En la Figura 4-27 se muestra la evolución del calor transferido para un arreglo con radio de 5 [cm] y una separación de 50 [cm] entre tubos. Inicialmente, ambos tubos tienen gran capacidad de intercambio con el medio, actuando como tubos independientes con flujos de alrededor de 400 W/m^2 (no se muestra en el gráfico pues son solo las primeras horas). Luego, la región se calienta y el calor disminuye en el tiempo. El tubo central genera una diferencia de flujo en relación al tubo lateral de aproximadamente $10 \text{ [W/m}^2\text{]}$ desde día 10 y continúa con esa diferencia durante toda la temporada, disminuyendo ambas curvas de forma paralela con una pendiente similar.

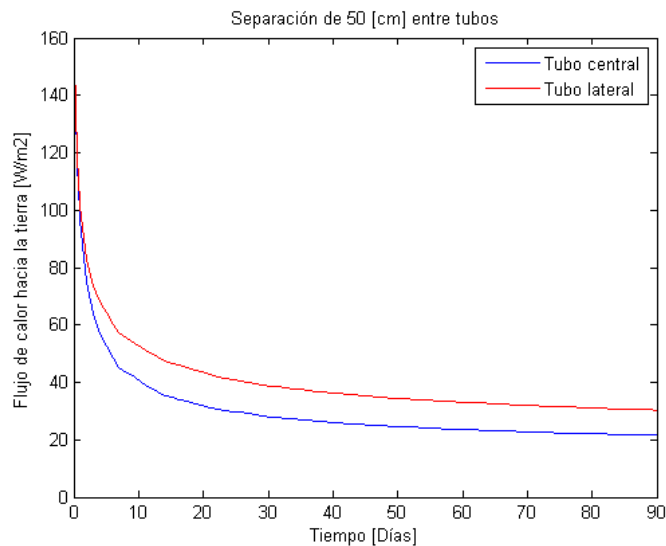


Figura 4-27: Comparación del calor en función del tiempo entre el tubo central y lateral en un arreglo de 3 tubos.

A mayores separaciones, la diferencia de flujo entre el tubo lateral y el tubo central disminuye (Figura 4-28). Al aumentar el radio de los tubos, la transferencia de calor disminuye (como se indica en la sección 4.4.5) y la diferencia entre el tubo central y lateral es casi constante para un mismo distanciamiento. Es decir, depende del distanciamiento, cuanto calor menos absorbe el tubo central en relación al lateral.

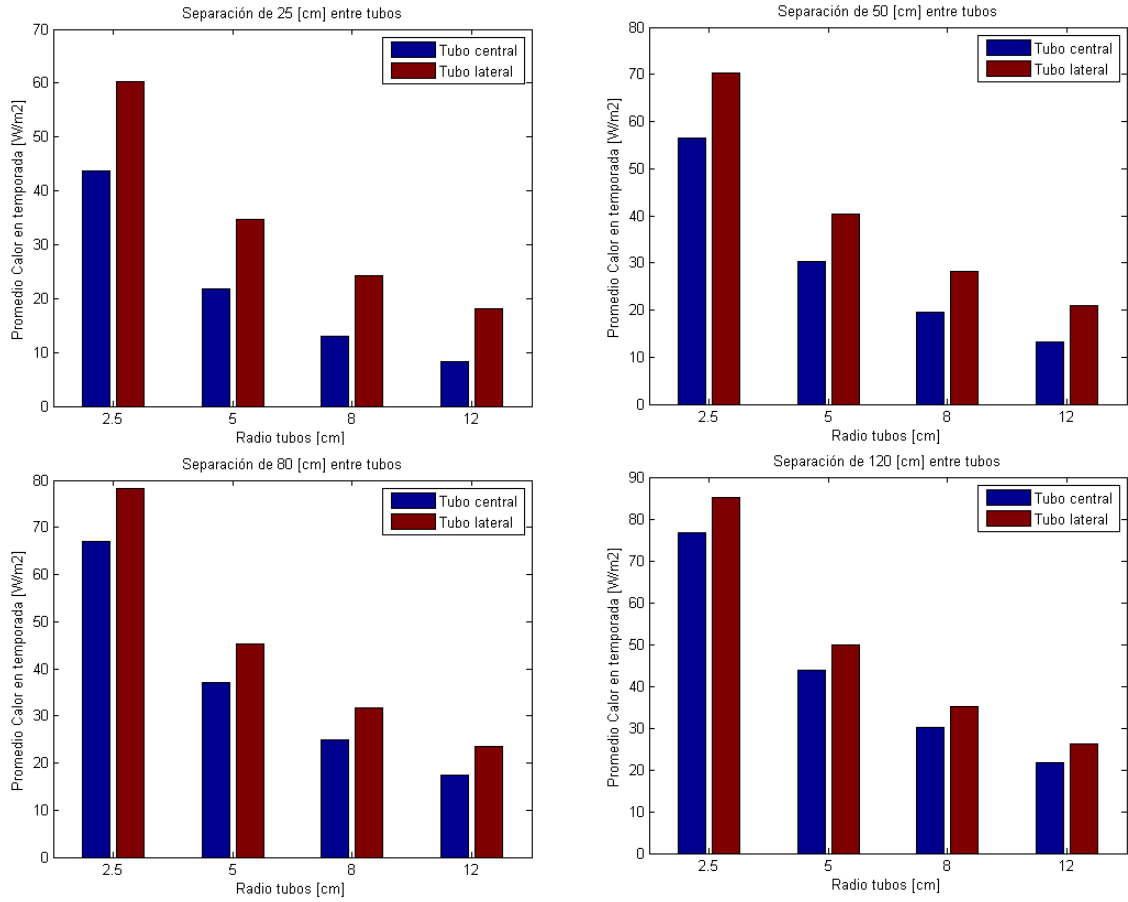


Figura 4-28: Comparación del promedio de flujo de calor entre tubos centrales y laterales en arreglos de 2 tubos.

4.5.8. Comparación tubos laterales en arreglos de 2 y 3 tubos

Se comparan la transferencia de calor (Figura 4-29) de los tubos laterales en arreglos de 2 tubos (azul) y arreglos de 3 tubos (rojo). Se observa que añadir un tubo adicional, si bien ambos tubos laterales tienen 3 direcciones libres (arriba, abajo y derecha), el tubo adicional separado por $2S$, modifica la temperatura del medio de tal forma que disminuye su capacidad de transferencia levemente. Esta disminución es aproximadamente 10% en tubos de radio pequeño y la diferencia se vuelve prácticamente despreciable para tubos de radio mayor a 8 [cm] o separaciones más grandes que 120 [cm].

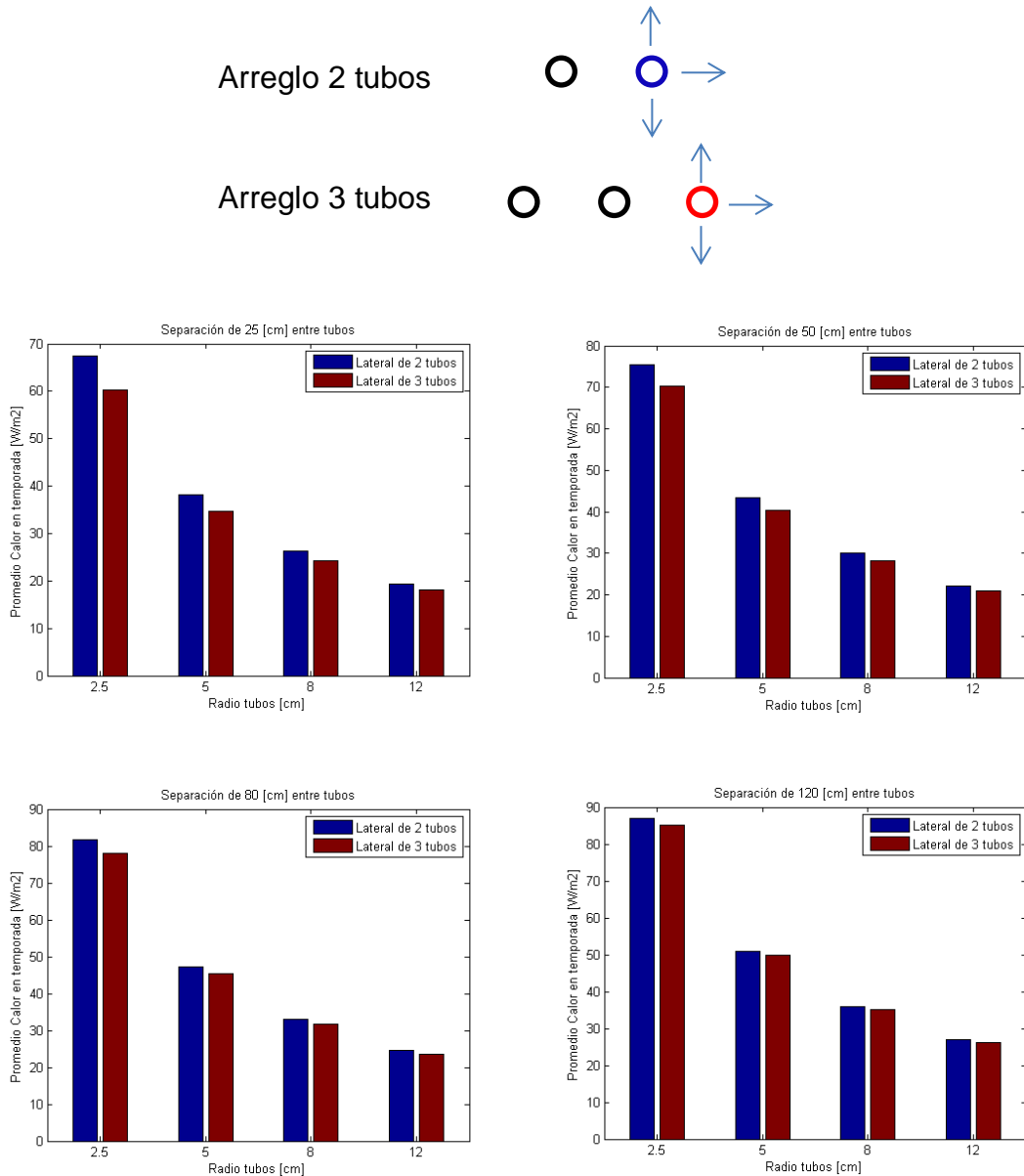


Figura 4-29: Comparación de transferencia de calor en tubos laterales de arreglos de 2 y 3 tubos

4.6. Estudio de casos

Se busca determinar cuánto cambia el coeficiente global de transferencia U_{global} al añadir la resistencia térmica del suelo. Se comparan los resultados con los del modelo incompleto, el cual asume la temperatura de la pared del tubo, es igual a la del suelo sin perturbación.

4.6.1. Cálculo U global

El coeficiente global de transferencia, se calcula considerando las 3 resistencias en series (fluido interno, pared del tubo y suelo), tal como se muestra en la ecuación siguiente

$$U_{global} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}} + \frac{r_e \ln(r_e/r_i)}{k_T} + \frac{r_e}{r_i h_i}}$$

Donde:

r_e : Radio exterior del tubo

r_i : Radio interior del tubo

k_T : Conductividad térmica del tubo

\bar{h} : Conductancia promedio del suelo alrededor del tubo en un periodo de 3 meses. Se estima usando la fórmula obtenida a partir de los resultados de las simulaciones (ver sección 4.4.7)

h_i : Coeficiente convectivo del flujo interno. Éste, está dado por el número de Nusselt para un flujo completamente turbulento (Ecuación Dittus-Boelter (8))

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4}$$

Las propiedades del fluido (agua y aire) se evalúan a una temperatura de 300 K.

4.6.2. Análisis de casos

Se seleccionan 4 casos distintos. El primero se elabora con los mismos datos de entrada que el trabajo de **Yoon** (4). Este estudio, corresponde a un edificio público en Aichi, Japón, que cuenta con un sistema de intercambiador aire-tierra.

Los otros tres casos se configuran con datos seleccionados arbitrariamente, pero manteniendo las variables dentro de rangos realistas, de tal modo que representen adecuadamente sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía. El material de los tubos a estudiar son Polipropileno (9), polietileno (1) y cobre (10).

Los casos 1 y 2 corresponden a intercambiadores de calor aire tierra, en el cual el fluido es aire y los diámetros son mayores (lo que implica mayores espesores de pared),

mientras que los caso 3 y 4 corresponden a bombas de calor geotérmicas donde el fluido es agua y los diámetros son menores.

Se comparan el coeficiente de transferencia global al incluir o no incluir la resistencia térmica del suelo.

Tabla 4-3: Comparación coeficiente de transferencia global considerando la resistencia térmica del suelo con el del modelo incompleto para diferentes casos.

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	
Suelo	Tipo Suelo	Arenoso	Arcilla-Arenosa	Arcilla-Limo Saturado	Arena Seca	
	Conductividad térmica	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	1,3	2,3	1,7	0,5
	Difusividad térmica	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	$6,9 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$7,4 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-7}$
	h_{suelo}	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	5,2	18,0	25,2	12,4
Tubo	Material Tubo	PVC	Polipropileno	Polietileno	Cobre	
	Diámetro externo	$[cm]$	50	20	7,5	4
	Conductividad térmica	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	0,17	0,9	0,47	401
	Espesor	$[mm]$	24	18,2	8,5	1,8
	h_{tubo}	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	6,9	47,2	52,1	$2,17 \cdot 10^5$
Fluido	Tipo Fluido	Aire	Aire	Agua	Agua	
	Velocidad	$[m/s]$	2,5	4,0	1,0	0,7
	Reynolds	$[-]$	149.736	91.503	147.049	59.274
	h_{fluido}	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	7,6	13,5	3004,4	2523,4
U_{global} <u>sin considerar</u> resistencia térmica del suelo	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	3,6	10,5	51,2	2494,5	
U_{global} <u>considerando</u> resistencia térmica del suelo	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	2,1	6,6	16,9	12,4	
Sobreestimación al no considerar la R_{suelo}		70,1%	58,2%	203,4%	20099%	

Los resultados indican que al no considerar la resistencia térmica del suelo, la capacidad de transferir calor por parte de los tubos enterrados se sobreestima. La

magnitud de la sobreestimación depende de cuán pequeña sea la conductancia del suelo en relación a las conductancias de la pared y del fluido interno. Se observa también que existe una diferencia importante en la conductancia del fluido interno dependiendo si se trata de aire (caso 1 y 2) o agua (caso 3 y 4). Las conductancias de la pared del tubo pueden llegar a ser un factor limitante cuando se tienen tubos de gran diámetro (por lo tanto paredes gruesas) y materiales poco conductores (caso 1), pero en los casos 2, 3 y 4 la conductancia es alta en comparación a la conductancia del suelo.

5. DISCUSIÓN

La instalación del circuito de tubos enterrados es una de las partes medulares de un sistema de climatización geotérmica, ya que involucra casi el 50% de los costos de inversión y su modificación posterior es poco factible. Es por esto que su diseño debe realizarse con gran precisión para lograr los buenos niveles de eficiencia que caracterizan estas instalaciones y que justifican sus altos costos iniciales.

5.1. Métodos numéricos y sus resultados

Los resultados de las simulaciones verifican que el calor transferido entre el suelo y los tubos tienen un comportamiento lineal con la diferencia de temperatura, por lo tanto, el problema de la resistencia térmica del suelo se puede modelar efectivamente como una conductancia h análoga a la ley de enfriamiento de Newton: $q = h\Delta T$.

Además, los resultados de la conductancia en función de diferentes variables muestran una clara relación con la solución analítica.

$$h = \frac{4k}{R\pi^2} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{-\alpha u^2 t}}{J_0^2(uR) + Y_0^2(uR)} \right] \frac{du}{u}$$

Esto indica que las simulaciones entregan resultados coherentes con el problema físico, lo cual valida el propósito de estudiar el problema a partir de cálculos con elementos finitos usando el software COMSOL.

En concordancia con lo observado en la solución analítica, la variable que más influye sobre la transferencia de calor es la conductividad térmica del suelo. La difusividad térmica tiene una relevancia menos significativa, pero no despreciable. Estas propiedades termofísicas deben ser conocidas con precisión al momento de realizar el diseño de un sistema de captación geotérmica. Para ello, es indispensable realizar sondeos que permitan medir directamente las propiedades térmicas del terreno que se va a utilizar.

La ecuación precedente implica que la conductancia del suelo disminuye a medida que se aumenta el radio del tubo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para calcular el calor transferido total (considerando solo la resistencia térmica del suelo) se debe multiplicar por el área de intercambio que también involucra la variable R .

$$Q = \bar{h}A\Delta T$$

Reemplazando la conductancia \bar{h} por el ajuste a partir de las simulaciones para un tubo único y expresando el área A como el producto entre el perímetro y el largo del tubo se obtiene

$$Q = \left(\frac{6,889 \cdot k \cdot \Delta t^{0,14}}{R^{0,696} \cdot \alpha^{0,109}} \right) (2\pi RL) \Delta T$$

Entonces

$$Q \propto R^{0,304}$$

Se tiene que la conductancia $[W/m^2]$ disminuye a medida que se aumenta el diámetro del tubo, pero al mismo tiempo se incrementa la superficie de intercambio. Considerando ambos efectos el calor total será mayor a mayor diámetro de tubo.

De todas formas, esta variable difícilmente se puede modificar para optimizar la transferencia de calor, ya que debe responder a otras exigencias como costo del material, régimen del fluido interno, pérdida de carga a lo largo del circuito, resistencia a presiones del suelo, resistencia a la corrosión, etc. Es por esto que el radio del tubo se define con anterioridad al dimensionamiento del sistema de colección y debería considerarse como una variable de entrada y no como una variable dependiente en esta etapa del cálculo.

La fórmula de la conductancia entregada en la sección 4.4.7 permite una fácil y rápida evaluación de la resistencia térmica del suelo. A pesar de que no tiene consistencia dimensional, resume en tan solo una pequeña fórmula, una gran cantidad de colección de datos. Esta fórmula fue seleccionada entre las diferentes propuestas arrojadas por el software EUREQA debido a la simplicidad de sus operaciones (solo contiene multiplicaciones, divisiones y potencias), de tal forma que permita una evaluación rápida con una calculadora manteniendo un buen grado de precisión.

El software EUREQA también entrega otros ajustes con errores prácticamente despreciables, pero las fórmulas son considerablemente más complejas y grandes. Estas últimas, serían de gran utilidad en la elaboración de software para el diseño asistido de proyectos de climatización geotérmica, ya que a pesar de su mayor grado de dificultad, gracias a la gran velocidad de cómputo de un computador, se tendrían resultados prácticamente instantáneos una vez ingresadas las variables.

Estas fórmulas generan una solución práctica a un problema, que de otro modo se debería evaluar mediante simulaciones específicas para cada caso, lo cual implicaría tiempo de trabajo y personal capacitado o mediante la fórmula analítica, la cual requiere un mayor grado de conocimiento y tiene dificultades numéricas que generan problemas a la hora de evaluarla (funciones de Bessel, integral con límite superior infinito e integrando que tiende a $-\infty$ en torno a cero).

5.2. Algunos criterios de diseño para sistemas de tubo único

En algunos métodos de diseño el dimensionamiento de los tubos enterrados se realiza en función de un valor fijo de capacidad de intercambio térmico por parte de los tubos, pero debido a la modificación de temperatura del suelo, la capacidad de intercambio

térmico va declinando a medida que avanza la estación (Figura 4-9). Es por esto que el valor seleccionado inevitablemente va a subestimar o sobreestimar la transferencia de calor por parte de los tubos en prácticamente la totalidad de cada temporada.

Utilizar el valor mínimo de transferencia que se logra al final de la estación, asegura que el sistema otorgue la capacidad de calefacción o refrigeración máxima para el cual fue calculado, pero implicaría disponer de grandes extensiones de tuberías que estarían sobredimensionadas durante todo el periodo.

Usar el promedio durante la estación es una opción recomendable, ya que el calor estaría subestimado durante el primer mes y los dos meses siguientes se tendrá una sobreestimación moderada que aumentará a medida que avanza el tiempo y que logrará una diferencia máxima de 15% respecto al calor real que se transfiere solo al final del periodo.

Debido a las características de estas instalaciones, es muy difícil mantener la bomba de calor funcionando siempre a su máxima eficiencia, ya que inevitablemente existirán variaciones de la capacidad de captar calor por parte del suelo o variaciones en la demanda de climatización, por lo cual se está obligado a sobre o subestimar la transferencia de calor en diferentes periodos durante la temporada.

Entonces, es sensato usar el promedio de capacidad de colección de calor para estimar y diseñar como si fuera un valor fijo, ya que a pesar de que se sobreestime la transferencia de calor durante un largo periodo, la magnitud de esta sobreestimación no es tan grande. Además, permitiría no tener que instalar un sistema de colección, que esté sobredimensionado durante la mayor parte del tiempo. (Aquí he propuesto separar las ideas diferentes en párrafos diferentes, lo cual las realza más)

Si bien la propuesta de utilizar el promedio para fines de diseño es una elección equilibrada, el valor de la capacidad de intercambio por parte de los tubos para el dimensionamiento de éstos, dependerá finalmente del proyecto específico del sistema de climatización, ya que pueden existir diferentes criterios según las circunstancias particulares de cada proyecto (eficiencia, capacidad máxima de calefacción/refrigeración, costos, disponibilidad de materiales o maquinaria, sistemas secundarios de climatización, etc.). En los casos en que sea indispensable otorgar cierta carga térmica sería recomendable usar valores más bajos que el promedio.

5.3. Sistemas de dos o más tubos. Interferencia térmica entre tubos

La interferencia térmica entre tubos cercanos, tiene un efecto significativo de reducción de la capacidad de intercambio térmico por parte de los tubos. Incluso a distancias mayores que 1 metro, la capacidad de transferencia térmica se reduce considerablemente. Esto se debe a que la zona intermedia entre los tubos, al recibir el aporte de calor de 2 tubos de forma simultánea, incrementa rápidamente su temperatura, disminuyendo la diferencia de temperatura entre los tubos y el medio (en

esa dirección) y por lo tanto disminuyendo la transferencia de calor conductivo. La energía térmica seguirá evacuándose en sus direcciones libres con facilidad, pero lo hará a una tasa mucho menor hacia las zonas saturadas de energía.

En los primeros instantes, ambos tubos se comportan como tubos independientes, calentando el suelo próximo a cada uno. La interferencia comienza antes de transcurrido un día, en el momento que las señales de temperatura de cada tubo se encuentran.

Para una evaluación rápida de la interferencia térmica entre dos tubos paralelos, se entrega una fórmula que depende del radio de los tubos y de la distancia entre éstos (sección 4.5.3). Ésta, también puede ser considerada como una colección de datos resumidos en una fórmula, con la cual se podría generar software para diseño asistido en que se involucren todas las variables del problema y optimizar el diseño.

La interferencia total en arreglos de 3 tubos paralelos, es mayor que la de 2 tubos, debido a que la zona entre los tubos aumenta muy rápido de temperatura, impidiendo que se transmita calor en esa dirección. Comparativamente los tubos laterales de arreglos de 2 y 3 tubos tienen poca diferencia, ya que en ambos casos hay solo una dirección (en la línea perpendicular a los tubos) que se restringe fuertemente la transferencia de calor. La razón del aumento del porcentaje de interferencia de arreglos de 3 tubos en relación arreglos de 2 tubos, se debe a que el tubo central tiene 2 direcciones que se restringe el calor, lo que produce una disminución considerable de flujo de calor.

Se observa también que la disminución de calor debido a un tercer tubo en un arreglo de 2, es considerablemente menor que agregar un segundo tubo a un tubo único. Extrapolando el resultado, se predice que al aumentar en un tubo un arreglo de n tubos, el aumento de la interferencia térmica será menor a medida que n sea más grande, o sea que, la influencia sobre la capacidad de transferencia del arreglo al agregar un tubo adicional, será cada vez menos significativo.

La separación entre tubos es un parámetro muy importante en el diseño del arreglo de tubos enterrados. La disposición de los tubos deberá satisfacer las restricciones de espacio y la demanda de energía térmica. Si se dispone de un espacio muy reducido, se deberá evaluar si es conveniente enterrar un arreglo muy compacto, considerando que la capacidad de intercambio térmico de cada tubo estará fuertemente disminuida debido a los tubos cercanos y el incremento total de calor por cada tubo paralelo adicional será cada vez menor, incrementará la pérdida de carga del fluido transportador de la energía y al mismo tiempo el costo destinado en materiales.

Es importante notar que la interferencia térmica que sufre un tubo único, debido a un segundo tubo colocado a una distancia $2S$, es considerablemente mayor que la disminución de calor, a la cual se ve afectado un tubo de un arreglo doble, debido a un tercer tubo colocado a la misma distancia (con un tubo de por medio). Con esto se puede inferir, que no se puede usar los resultados de interferencia entre 2 tubos para

calcular interferencia en arreglos de mayor cantidad de tubos, como si fueran interferencias independientes entre ellas.

La interacción entre tubos con otro tubo de por medio, se debe a que la energía térmica compite por difundir en el espacio, pero la zona donde se compite es más distante de los tubos. Esto produce que el gradiente en torno al tubo disminuya, pero sin identificar una zona saturada con muy baja transferencia de calor, como ocurre con la zona intermedia de tubos contiguos.

6. CONCLUSIONES

El modelo numérico en COMSOL resulta adecuado para estudiar la resistencia térmica del suelo alrededor de los tubos. Si bien los cálculos numéricos siempre poseen un grado de error, las simulaciones se realizaron siempre con mallas suficientemente finas para asegurar resultados independientes de la malla, es decir, que el error numérico sea despreciable.

En este mismo sentido, el ajuste del tamaño del dominio poniendo énfasis en que la señal de temperatura no interactúe de forma apreciable con el borde externo, permite simular en un dominio finito el problema, sin que esto afecte las soluciones de forma relevante. De este modo, los resultados son consistentes con las fórmulas analíticas presentadas en la sección de antecedentes y con la literatura.

Los ensayos del modelo de tubo único permitieron no sólo afinar la técnica numérica determinando el tamaño de la región, sino también caracterizar la distribución de temperatura alrededor del tubo. El tubo produce una variación inmediata de la temperatura en su entorno más cercano. Esta variación hace disminuir el gradiente de temperatura normal al tubo, que es inicialmente muy alto. Entonces el flujo de calor entre el tubo y el medio, y la correspondiente conductancia térmica van disminuyendo en el tiempo, alcanzando valores muy bajos al final de un período estacional de tres meses. Debido a esta disminución se caracteriza la conductancia o el flujo de calor por valores medios a lo largo del intervalo de tiempo estacional. Para fines de diseño se propone usar el promedio de calor durante el tiempo de funcionamiento, pero podría usarse algún valor menor aun según los requerimientos específicos de cada proyecto.

El ajuste de los resultados de transferencia de calor para un tubo único en función de diferentes variables, permite estimar la resistencia térmica del medio alrededor de un tubo de forma sencilla y rápida. Así, mediante la simple colección de datos de simulaciones en una fórmula, se puede cuantificar objetivamente este fenómeno y realizar diseños de tubos enterrados con mejor precisión.

Al considerar el intercambio de calor de un tubo que forma parte de un arreglo de dos tubos paralelos, se observa una importante disminución en transferencia de calor en relación a un tubo único. Esta disminución se debe a que en el espacio entre los dos tubos la temperatura del medio tiende a aproximarse a la temperatura de la pared del tubo, lo cual se acentúa más a medida que pasa el tiempo. Solamente para tiempos muy cortos (un día o menos) los tubos de un arreglo se comportan como tubos independientes.

El espaciado entre tubos es un factor importantísimo para considerar la interferencia térmica a la hora de diseñar un circuito de tubos enterrados, pues si la separación es pequeña la reducción de calor es de hasta 40%. Incluso a 1 metro de distancia (espaciado típicamente sugerido en documentos) se tiene una disminución de entre un 13% y un 19% en relación a un tubo enterrado sin interferencia.

La interferencia térmica entre 3 tubos, disminuye la transferencia de calor principalmente del tubo central, pero de igual manera disminuye levemente la transferencia si se comparan solo los tubos laterales (entre arreglos de 2 y 3 tubos). El problema de interferencia térmica en arreglos de 3 tubos, no es independiente para cada par tubos y no permite establecer reglas generalizadas a partir de los resultados de interferencia en arreglos de 2 tubos. Queda propuesto establecer leyes o formas de fácil evaluación para arreglos de n tubos, pues sería de gran utilidad en el sentido que usualmente se instalan serpentines que pueden ser considerados como varios tubos paralelos.

De las 3 resistencias térmicas en serie que se proponen en el modelo, la “resistencia térmica del suelo”, se vuelve un factor limitante para la transferencia de calor. Dependiendo de las diferentes configuraciones tendrá mayor o menor relevancia en comparación a la resistencia térmica de la pared de tubo y del fluido interno, pero no debería ser ignorada en ningún caso. Además, no considerar el efecto de la modificación de temperatura en torno a los tubos, hace caso omiso a la interferencia térmica entre tubos.

7. REFERENCIAS

1. **RETScreen International. CETC.** *Clean Energy Project Analysis. RETScreen Engineering and Case Textbook. Ground Source Heat Pump Project Analysis.* Minister of Natural Resources Canada. Canada : s.n., 2005. pág. 7. 0-662-39150-0.
2. **De Paepe, M y Janssens, A.** *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchanger.* Department of FLOW, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University. Ghent, Bélgica : Energy and Buildings, 2003. págs. 389-397.
3. **Florides, Georgios y Kalogirou, Soteris.** *Ground heat exchanger - A review of systems models and applications.* Cyprus : Renewable Energy, 2006.
4. **Yoon, Gyuyoung, Tanaka, Hideki y Okumiya, Masaya.** *Study of design procedure for a multi-cool/heat tube system.* s.l. : Solar Energy, 2009. págs. 1415-1424.
5. **Heidt, F D.** *GAEA. Calculation Tool for Earth-Heat-Exchangers.* [Software Comercial] Seigen, Alemania : University of Siegen. Division of Building Physics & Solar Energy.
6. **Asociación técnica española de climatización y refrigeración.** *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.* Madrid : s.n., 2008.
7. **Carslaw, H S y Jaeger, J C.** *Conduction of heat in solids.* Segunda. Londres : Oxford University Press, 1959.
8. **Incropera, Frank P y DeWitt, David P.** *Fundamentos de Transferencia de Calor.* México : Prentice Hall, 1999. 970-17-0170-4.
9. **REHAU Ltd.** Awadukt PP TL heavy duty sewer pipe system. [En línea] [Citado el: 12 de Julio de 2013.] Empresa Inglesa que ofrece instalaciones de refrigeración geotérmica.
http://www.rehau.com/GB_en/Building_Solutions/Waste_Water_Management/Pipeline_Renovation/AWADUKT_PP_TL_Heavy_Duty_Pipe_System/.
10. **Thevenard, Didier.** *Bibliographic Search on the Potential of Earth Tubes.* Numerical Logic Inc. Waterloo : s.n., 2007. pág. 1.
11. **Asociación técnica española de climatización y refrigeración.** *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.* Madrid : s.n., 2008.
12. **Meneses, Orlando.** *Diseño de un intercambiador de calor aire-tierra para generar calefacción y climatización de edificios en Santiago.* Santiago : s.n., 2007.
13. **Man, Yi.** *A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchanger.* Hong Kong, China : International Journal heat and mass transfer, 2009. págs. 2593-2601.

14. **Dowlatabadi, Hadi, Hanova, Jana y Mueller, Lynn.** *Ground source heat pump systems in Canada.* Resources for the future. Washington, DC : s.n., 2007.
15. **Arpact, Vedat S.** *Conduction Heat Transfer.* Reading : Addison-Wesley Publishing Company, 1966. págs. 406-407. 66-25602.