



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

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE SISTEMAS
ESTRUCTURALES TERMO-ACTIVOS EN EL CONTEXTO DE TÚNELES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RAIMUNDO GUILLERMO CIRANO REBOLLEDO

PROFESOR GUÍA:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALVARO VALENCIA MUSALEM

ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: RAIMUNDO G. CIRANO REBOLLEDO
FECHA: 22/09/2014
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES TERMO-ACTIVOS EN EL CONTEXTO DE TÚNELES

El presente trabajo de título tiene como objetivo estudiar el comportamiento térmico y el diseño de un intercambiador de calor plano dispuestos en estructuras termo-activas en el contexto de túneles, específicamente en el túnel de la Línea 4 del Metro de Santiago. Es decir, estudiar el comportamiento de tubos por el que circula un refrigerante, los cuales se introducen en la estructura de concreto (estructura termo-activa) que sostiene el túnel en el momento de su construcción.

La gran ventaja de este sistema es que no se tienen costos de perforación o construcción de la estructura termo-activa ya que los tubos se instalan antes de que sea vertido el concreto y luego es el mismo concreto el que le da soporte a los tubos. Y al mismo tiempo la estructura de concreto, que está rodeada de alguna fuente de calor, transmite esa energía al fluido refrigerante que circula por el tubo.

En el caso del presente estudio se modela un serpentín de tubos en zig-zag embebido en la estructura de concreto que le da soporte al túnel de la línea 4 del Metro de Santiago, específicamente en el tramo comprendido entre la estación Tobalaba y la estación Grecia. Por lo tanto el modelo tiene las dimensiones de dicho túnel, considera las condiciones ambientales dentro del túnel y las características propias del suelo donde se encuentra ubicado.

El estudio considera solo absorción de calor, por lo que solo sirve para calefacción. Esto debido a que la temperatura promedio del aire al interior del túnel es de 20°C en invierno y 30°C en verano. Por lo tanto el líquido refrigerante que circula por los tubos embebidos, en este caso agua, absorbe calor desde dos fuentes, el suelo que rodea la estructura de concreto por el exterior y la otra fuente es el aire caliente que circula dentro del túnel.

Al analizar los resultados obtenidos de la modelaciones se puede observar la importancia de la separación con que se instalan los tubos y la velocidad de flujo del refrigerante. La separación de tubos incide directamente con la cantidad de metros de tubo instalado y por consiguiente la cantidad de área de transferencia. Para velocidades altas de flujo de refrigerante aumenta la transferencia por convección debido a dos cosas, el aumento de flujo másico y el aumento de la turbulencia.

Como resultado final se obtiene que con 10 metros de túnel, en invierno se puede llegar a absorber 6.900 [W] y en verano 10.300 [W], de los cuales en promedio el 75% provienen del aire caliente del túnel. Además se obtiene que en un kilómetro de túnel se puede llegar a reducir la temperatura del aire 5°C en invierno y 8°C en verano.

*Para mi familia, mis padres, mi polola,
mis hermanos, mis abuelas y mi perro.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis papás, Osvaldo Cirano y Elizabeth Rebolledo. Ustedes me han dado todo, y gracias a su enorme esfuerzo soy el hombre que soy. Se han sacrificado para darnos a mí y a mis hermanos todas las herramientas para lograr nuestras metas; y nos han enseñado con el ejemplo los valores y virtudes para ser hombres y mujeres de bien. Gracias por confiar siempre en mí.

A mi polola Camila, gracias por estos 7 increíbles años juntos. Gracias por tu enorme paciencia y por ser mi mejor amiga. Por confiar incondicionalmente en mí y darme el valor para alcanzar mis grandes metas. Eres la alegría de mi vida y mi mayor apoyo.

A mis hermanos Matías, Belén, José Tomás, Isabel y Magdalena. Gracias por todas las risas compartidas y su apoyo incondicional. A la Pollo, por darle a nuestra familia la alegría más grande que son la Amanda y Gaspar.

También quiero agradecer a mis abuelas. A la Lela por siempre preocuparse de hacerme compañía, de venir a verme y regalarme. A la Nena, por recibirme siempre en su casa con los brazos abiertos y comida exquisita. Y a la Mai, mi abuela postiza, gracias por siempre encontrar la forma de hacerme reír.

A los papás de mi polola Carlos y Ani. Gracias por lo generosos que han sido conmigo, y por quererme como a un hijo.

Además quiero agradecer a mis amigos de la vida, especialmente a los valdivianos que han sido como una familia en estos años viviendo lejos de mi casa. A mis Compañía de Bomberos, la Primera, que es mi segunda casa y mi orgullo.

A mis amigos de la Universidad, gracias por hacer menos terribles las largas jornadas de estudio y trasnoche juntos.

Por último, quiero agradecer a toda la gente que fue parte del desarrollo de este trabajo de título. A mi profesor guía Williams Calderón, por su paciencia y enorme disposición a ayudarme y resolver mis dudas. Al profesor Mauricio Toledo por su motivación en el trabajo. A Sebastián Maggi y Fernando Fuenzalida, gracias por su valiosa ayuda y tiempo en la modelación de mi trabajo. A los de la oficina de memoristas, por hacer más amenos los largos días de trabajo. A Soledad Morales por su permanente disposición. Y a Carlos Espinoza, Ingeniero del Metro de Santiago, por ayudarme con información fundamental para la modelación del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	iii
Indice de tablas	vi
Indice de ilustraciones.....	vii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Alcances.....	4
2. Antecedentes	5
2.1. Geotermia	5
2.1.1. Perfil de temperaturas bajo tierra.....	5
2.1.2. Ventajas y desventajas de la geotermia	6
2.2. Sistema de bomba de calor.....	6
2.3. Transferencia de calor.....	8
2.3.1. Conducción.....	9
2.3.2. Convección	9
2.4. Estructuras termo-activas y tubos absorbentes	10
2.5. Túnel Línea 4 del Metro de Santiago.....	11
3. Metodología de trabajo.....	13
4. Desarrollo y resultados.....	14
4.1. Cálculo analítico	14
4.1.1. Caso tubos embebidos	15
4.1.2. Caso tubos no embebidos	17
4.2. Diseño del Modelo en Comsol	19
4.2.1. Geometría del túnel	19
4.2.2. Configuración de tubos.....	20
4.2.3. Módulos de Comsol utilizados	23
4.2.4. Condiciones de borde.....	25
4.2.5. Mallado	28
4.3. Modelación.....	30
4.3.1. Criterios y datos de entrada.....	30
4.3.2. Casos de simulación.....	32

4.4.	Resultados de modelaciones	38
4.4.1.	Temperatura de salida del agua	38
4.4.2.	Calor absorbido	41
4.4.3.	Calores aportados por el túnel y el suelo.....	45
4.4.4.	Perdida de presión en tubos.....	48
4.4.5.	Distribución de calor absorbido en tubos.....	50
4.4.6.	Variación de temperatura del aire del túnel	52
4.4.7.	Sensibilidad del coeficiente conductivo del concreto.....	56
5.	Discusiones.....	58
5.1.	Validación de calor.....	58
5.2.	Comparación con demanda térmica de Beauchef 851.....	59
5.3.	Flujo de calor en el suelo	60
5.4.	Selección de configuración adecuada.....	62
5.5.	Consideraciones física de los modelos	65
6.	Conclusiones.....	67
7.	Bibliografía	69
Anexo A.	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades de materiales presentes en el sistema estructural termo-activo. Fuente: (3).....	10
Tabla 2.2: Resumen de condiciones ambientales y estructurales Línea 4. Fuente: Metro S.A.	12
Tabla 4.1: Resumen de datos	15
Tabla 4.2: Propiedades de materiales. Fuente: (3).	20
Tabla 4.3: Análisis de sensibilidad de largo de placa. Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 4.4: Análisis de sensibilidad de la malla. Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 4.5: Características principales de la malla. Fuente: Elaboración propia.	30
Tabla 4.6: Temperaturas del aire del túnel para invierno y verano. Fuente: (7).	30
Tabla 4.7: Rango recomendado de temperaturas de ingreso a bomba de calor. Fuente: (8).....	31
Tabla 4.8: Rangos de temperaturas del fluido para un suelo a 16°C. Fuente: (3).....	31
Tabla 4.9: Casos simulados. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 4.10: Características principales de las tres geometrías. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 4.11: Temperaturas de salida del agua en invierno. Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 4.12: Temperaturas de salida del agua en verano. Fuente: Elaboración propia.	40
Tabla 4.13: Calor absorbido por el agua en invierno.....	42
Tabla 4.14: calor absorbido por el agua en verano. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 4.15: Aportes de calor del túnel y del suelo en invierno. Fuente: Elaboración propia.	45
Tabla 4.16: Aportes de calor del túnel y del suelo en verano. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 4.17: Perdidas de presión para invierno y verano. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4.18: Régimen del flujo para las distintas velocidades. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 4.19: Temperaturas de salida del aire del túnel en invierno. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 4.20: Temperaturas de salida del aire del túnel en verano. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 4.21: Calor absorbido para distintos coeficientes conductivos del concreto. Fuente: Elaboración propia.	56
Tabla 5.1: Comparación de calor estimado y calor entregado por Comsol.....	58
Tabla 5.2: Demanda térmica Beauchef 851. Fuente: (9).....	59
Tabla 5.3: Aporte de 100 metros de túnel a la demanda térmica de Beauchef 851 en el mes de Julio. Fuente: Elaboración propia.	60

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1: Estructuras termo-activas instaladas en Austria. Fuente: (1).....	1
Ilustración 1.2: Tubos absorbentes fijados a los refuerzos de fierro. Fuente: (1)	2
Ilustración 1.3: Esquema de tubos instalados en un túnel. Fuente: Elaboración Propia. .3	
Ilustración 2.1: Perfil de temperaturas en el suelo a baja profundidad. Fuente: (1).....	5
Ilustración 2.2: Esquema del ciclo de una bomba de calor reversible. fuente: (4).....	7
Ilustración 2.3: Diagrama T-S de un ciclo de compresión de vapor real. Fuente: (4)	7
Ilustración 2.4: Diagrama presión-entalpía de un ciclo de compresión de vapor. Fuente: (4).....	7
Ilustración 2.5: Sistema geotérmico. Fuente: (1)	8
Ilustración 2.6: Plano de vista en corte de túnel línea 4. Fuente: Metro S.A.	11
Ilustración 4.1: Diagrama de ubicación de tubos absorbentes. Fuente: elaboración propia.	14
Ilustración 4.2: Configuración para factor de forma S	15
Ilustración 4.3: Esquema de distancias y temperaturas del tubo.....	16
Ilustración 4.4: Esquema de configuración del tubo en contacto con el aire	17
Ilustración 4.5: Perfil de velocidad de un flujo interno	18
Ilustración 4.6: Partes del modelo del túnel.....	19
Ilustración 4.7: Partes del túnel vista isométrica.....	20
Ilustración 4.8: Configuración de tubos paralelos.....	21
Ilustración 4.9: Configuración de tubos en forma de zig-zag.....	22
Ilustración 4.10: Construcción de estructura de hormigón armado	22
Ilustración 4.11: Borde de suelo con temperatura constante	25
Ilustración 4.12: Bordes adiabáticos.....	26
Ilustración 4.13: Borde con flujo de calor convectivo.....	27
Ilustración 4.14: Gráfico de análisis de sensibilidad de la malla.....	29
Ilustración 4.15: Mallado del modelo con nivel extremely fine.....	29
Ilustración 4.16: Serpentin de tubos con separación de 30 centímetros	33
Ilustración 4.17: Mallado para geometría con separación de tubos de 30 centímetros..	34
Ilustración 4.18: Serpentin de tubos con separación de 50 centímetros	34
Ilustración 4.19: Mallado para geometría con separación de tubos de 50 centímetros..	35
Ilustración 4.20: Serpentin de tubos con separación de 70 centímetros	36
Ilustración 4.21: Mallado para geometría con separación de tubos de 70 centímetros..	36
Ilustración 4.22: Gráfico de temperaturas de salida del agua en invierno	39
Ilustración 4.23: Variación de temperatura del agua a lo largo del tubo para el caso de separación de 30 [cm] a 0,5 [m/s] en invierno	39
Ilustración 4.24: Gráfico de temperaturas de salida del agua en verano.....	41
Ilustración 4.25: Gráfico de calor absorbido por el agua en invierno	42
Ilustración 4.26: Gráfico de calor absorbido por metro de tubo en invierno	43
Ilustración 4.27: Gráfico de calor absorbido por el agua en verano	44
Ilustración 4.28: Grafico de calor absorbido por metro de tubo en verano	44
Ilustración 4.29: Gráfico de aporte de calor del túnel en invierno.....	46
Ilustración 4.30: Gráfico de aporte de calor del suelo en invierno	46
Ilustración 4.31: Gráfico de aporte de calor del túnel en verano	47
Ilustración 4.32: Gráfico de aporte de calor del suelo en verano.....	48

Ilustración 4.33: Gráfico de pérdidas de presión en invierno.....	49
Ilustración 4.34: Gráfico de pérdidas de presión en verano	49
Ilustración 4.35: Gráfico de distribución de calor con separación de 30 cm.....	51
Ilustración 4.36: Gráfico de distribución de calor con separación de 50 cm.....	51
Ilustración 4.37: Gráfico de distribución de calor con separación de 70 cm.....	52
Ilustración 4.38: Gráfico de calor absorbido por zona	52
Ilustración 4.39: Gráfico de variación de temperatura del aire en 1 Km de túnel en invierno.....	54
Ilustración 4.40: Gráfico de variación de temperatura del aire en 1 Km de túnel en verano	55
Ilustración 4.41: Gráfico de análisis de sensibilidad del coeficiente conductivo del concreto (R^2 =Coef. de determinación).....	57
Ilustración 5.1: Variación de temperatura del suelo y el concreto	61
Ilustración 5.2: Vista en corte de la variación de temperatura del suelo y concreto	61
Ilustración 5.3: Contornos isotérmicos en el suelo y el concreto	62
Ilustración 5.4: Imagen de temperaturas del agua al interior del serpentín para el caso de separación de 30 [cm] con velocidad de flujo de 0,1 m/s en verano	64
Ilustración 5.5: Distribución de temperatura del suelo y el concreto para separación de tubos de 30 [cm] a 0,1 [m/s] en verano	65

1. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo en el mundo demanda cada vez más energía poniendo a prueba el ingenio humano. Existen varias fuentes energéticas como la biomasa, combustibles fósiles, fuentes hídricas, eólicas, solares y geotermales.

La energía geotérmica es una fuente natural y constante de calor a lo largo de todo el día por lo que presenta una alternativa limpia a los métodos convencionales de obtención de calor, como la combustión de materia fósil. En el caso de fuentes geotermales superficiales, donde la diferencia de temperaturas no es muy alta, se requiere de sistemas de bombas de calor para poder aprovechar la energía disponible. El medio ambiente y el ahorro económico fueron los incentivos que llevaron al ingeniero en minas austriaco, Peter Ritter von Rittinger, a inventar la bomba de calor en 1855. Dos años más tarde demostró que se podrían ahorrar 293.000 metros cúbicos de leña si las bombas de calor estuvieran instaladas en todas las salinas de Austria. (1)

Las estructuras subterráneas como las fundaciones de edificios y túneles están activamente en contacto con la energía geotérmica presente en la tierra. El conjunto estructura-suelo conforman los llamados sistemas estructurales termo-activos. Desde principios de los ochentas en Austria la energía geotermal obtenida desde estructuras termo-activas ha ido aumentando, como se puede observar en el gráfico de la Ilustración 1.1 donde se muestra la cantidad de estructuras termo-activas instaladas por año.

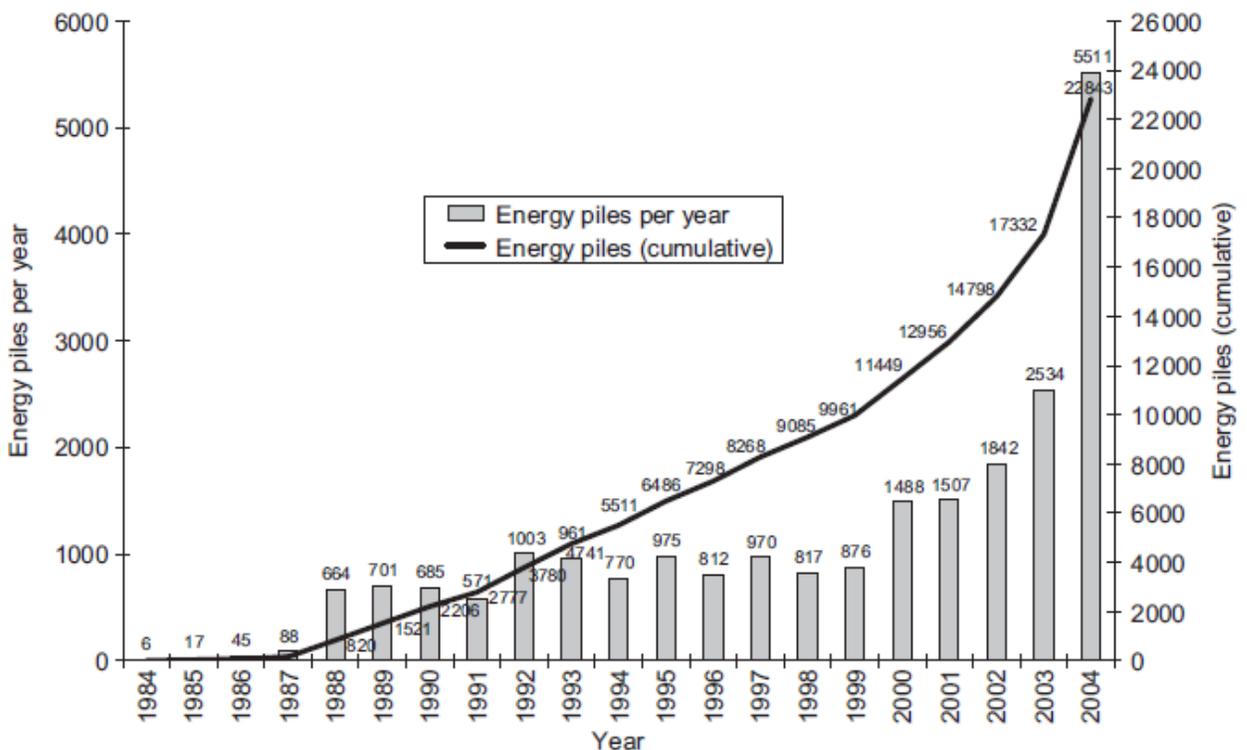


ILUSTRACIÓN 1.1: ESTRUCTURAS TERMO-ACTIVAS INSTALADAS EN AUSTRIA. FUENTE: (1).

1.1. MOTIVACIÓN

El método utilizado para transportar calor desde la estructura termo-activa consiste en la instalación de tubos absorbentes en la estructura antes de verter el concreto en el momento de la construcción. A través de los tubos absorbentes circula el fluido para el transporte de calor. Por ejemplo en la Ilustración 1.2 se puede apreciar los “loops” que generan los tubos absorbentes fijados en los refuerzos de fierro previo al vertido del concreto. Luego el conjunto de tubos absorbentes y la estructura forman un gran intercambiador de calor en contacto con la tierra.



ILUSTRACIÓN 1.2: TUBOS ABSORBENTES FIJADOS A LOS REFUERZOS DE FIERRO. FUENTE: (1)

Este innovador método es significativamente más económico que los métodos convencionales de utilización de energía geotermal, debido a que se utiliza el momento constructivo de la estructura termo-activa para instalar los tubos absorbentes. En los métodos convencionales se debe perforar la tierra para instalar el intercambiador, lo cual aumenta considerablemente el costo, alrededor del 80% de la instalación completa del sistema. En cambio, con este nuevo método el costo de perforación ya está asumido por la construcción misma de la estructura.

Por otro lado la tierra posee una temperatura constante bajo los 15 metros de profundidad que varía dependiendo de la zona geográfica. Es decir, bajo los 15 metros la temperatura del suelo solo está influida por la geotermia y no por las condiciones ambientales sobre la superficie ni por la estación del año en que se esté (1). Por lo tanto, gracias a la estabilidad de la temperatura del suelo bajo cierta profundidad y la utilización de una bomba de calor reversible, es posible, en invierno extraer calor del suelo para calefacción, y en verano depositar calor en el suelo para refrigeración. Otra ventaja de introducir los tubos en la estructura es que el concreto posee mejores

propiedades térmicas en comparación al suelo, como la conductividad y la capacidad de almacenamiento de calor.

Las estructuras termo-activas, presentan una interrogante sobre su comportamiento en cuanto a transferencia de calor se refiere, debido a que el calor se transfiere a través de la tierra, luego el concreto, después a la pared del tubo y finalmente al fluido caloportante. Además la configuración del serpentín hecho por el tubo, incidirá significativamente sobre la eficiencia del intercambiador. Y por otro lado las condiciones del suelo son variables dependiendo de la cantidad de agua, de la porosidad y de los minerales que contenga. La Ilustración 1.3 es una representación de cómo se disponen los tubos en la estructura.

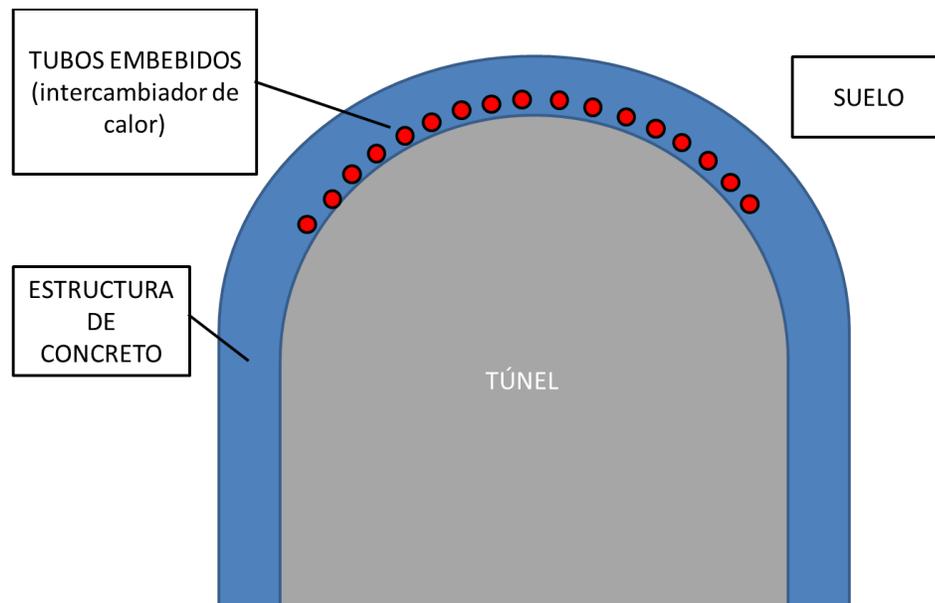


ILUSTRACIÓN 1.3: ESQUEMA DE TUBOS INSTALADOS EN UN TÚNEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Una forma de comprender el comportamiento del flujo de calor en la estructura es mediante la modelación numérica logrando aproximaciones a la realidad de un sistema complejo el cual sería muy difícil estudiar analíticamente. Específicamente se utilizará el software Comsol para diseñar y simular el modelo con distintas geometrías y condiciones ambientales.

Para acotar el tema, el estudio se basa en la modelación numérica de intercambiadores instalados en el túnel de la línea 4 del Metro de Santiago utilizando datos estructurales, geométricos y ambientales entregados por dicha empresa.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento térmico y el diseño de un intercambiador de calor plano dispuestos en estructuras termo-activas en el contexto de túneles, específicamente en el túnel de la Línea 4 del Metro de Santiago.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar analíticamente la configuración adecuada de posición del intercambiador con respecto a la estructura.
- Diseñar una distribución adecuada de los intercambiadores embebidos en la estructura.
- Modelar numéricamente el comportamiento térmico de un intercambiador de calor plano embebido en el revestimiento de un túnel.
- Estimar la cantidad de calor que se puede transferir por área de estructura en un contexto de operación de un túnel.

1.3. ALCANCES

- Análisis térmico basado en el diseño del túnel minero entre andenes de la línea 4 del Metro de Santiago, utilizando los datos reales entregados por Carlos Espinoza, Ingeniero de Vías y RAMS.

2. ANTECEDENTES

2.1. GEOTERMIA

La energía geotérmica, es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. La energía térmica proviene de la desintegración radiactiva de elementos presentes en el suelo como los isotopos radiactivos de Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K). El flujo de calor proveniente de la tierra está en un rango de $0,05 \text{ W/m}^2$ y $0,12 \text{ W/m}^2$. (2) (3)

Dependiendo de la profundidad y el lugar se puede obtener energía de alta y baja entalpía. La geotermia de alta entalpía es utilizada mayormente para la producción eléctrica mediante un ciclo de vapor con turbinas, e implica perforaciones profundas en ciertos lugares donde la diferencia de temperatura sea suficientemente alta. La geotermia de baja entalpía se utiliza principalmente para la climatización mediante distintos sistemas siendo los más comunes el sistema de intercambiador de calor aire-tierra y el sistema de bomba de calor.

2.1.1. PERFIL DE TEMPERATURAS BAJO TIERRA

La geotermia de baja entalpía es practicable en cualquier lugar debido a que la tierra bajo los 15 metros de profundidad comienza a tener una temperatura constante que dependiendo de la zona geográfica varía entre los 10 y los 25 °C dependiendo de la latitud siendo la más alta en los trópicos. Esta temperatura constante permite extraer calor desde el suelo en invierno, y depositar calor en el verano. En la Ilustración 2.1 se representa el perfil de temperatura bajo la tierra para las estaciones de verano e invierno.

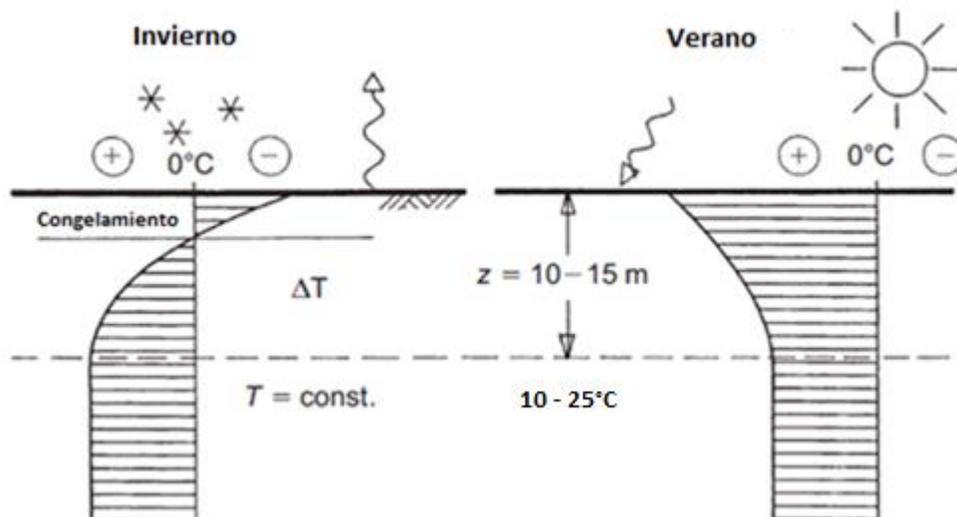


ILUSTRACIÓN 2.1: PERFIL DE TEMPERATURAS EN EL SUELO A BAJA PROFUNDIDAD. FUENTE: (1).

2.1.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA GEOTERMIA

- Ventajas (1):
 - Fuente que disminuye la dependencia energética de combustible fósiles y de otros recursos no renovables.
 - Los residuos producidos son mínimos comparados con los combustibles fósiles, lo que genera un menor impacto ambiental.
 - Sistema de gran ahorro monetario.
 - No genera ruidos ambientales.
 - Gran disponibilidad de fuentes geotérmicas.
 - No está sujeta al precio mundial como el petróleo o el gas.
 - No contribuye al efecto invernadero.

- Desventajas (1):
 - Dependiendo del sistema geotérmico utilizado, la fuente de calor puede acabarse.
 - Para geotermia de alta entalpía los costos de exploración son altos.

2.2. SISTEMA DE BOMBA DE CALOR

Una bomba de calor es una máquina que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo reducida. Por lo tanto, la ventaja que poseen las bombas de calor frente a otros sistemas, reside en su capacidad para aprovechar la energía existente en el ambiente, tanto en el aire como en el agua o la tierra.

Una bomba de calor consta de cuatro componentes principales. Un evaporador donde el fluido de trabajo absorbe calor a temperatura constante mediante el cambio de fase de líquido a gas, luego el compresor aumenta la presión y temperatura del fluido para luego pasar por el condensador donde entrega calor al exterior, y finalmente el fluido condensado pasa por una válvula de expansión donde disminuye su presión y temperatura. En la Ilustración 2.2 se observa un esquema del ciclo reversible, es decir, cuenta con una válvula para invertir el flujo de tal manera que el sistema funcione en invierno y verano. En la Ilustración 2.3 y la Ilustración 2.4 se muestran los ciclos termodinámicos de compresión de vapor presentes en una bomba de calor.

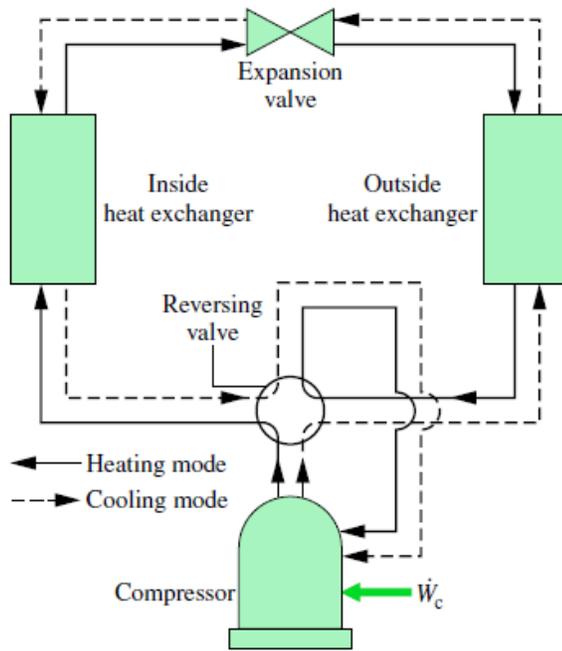


ILUSTRACIÓN 2.2: ESQUEMA DEL CICLO DE UNA BOMBA DE CALOR REVERSIBLE. FUENTE: (4)

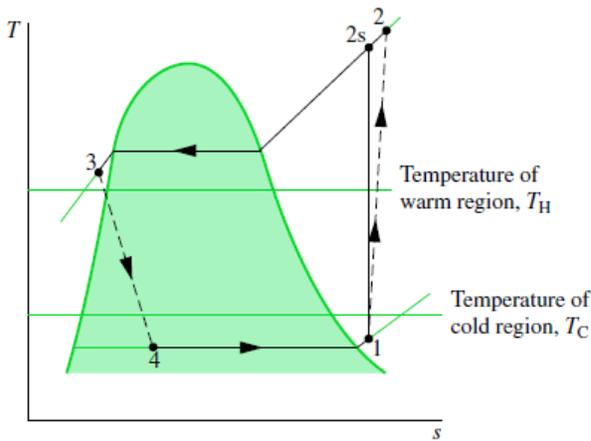


ILUSTRACIÓN 2.3: DIAGRAMA T-S DE UN CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR REAL. FUENTE: (4)

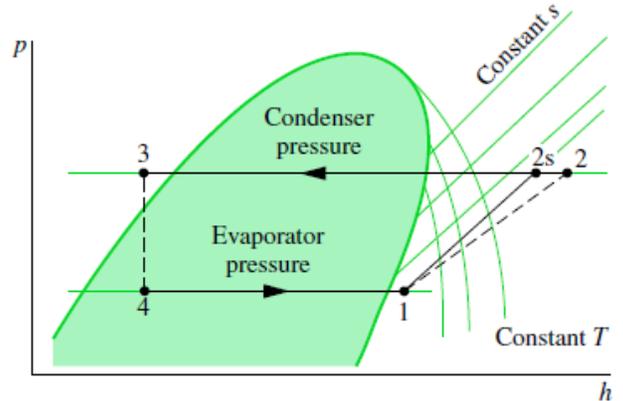


ILUSTRACIÓN 2.4: DIAGRAMA PRESIÓN-ENTALPÍA DE UN CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR. FUENTE: (4)

Un parámetro para medir la eficiencia de un sistema de bomba de calor es el Coeficiente de Performance, en inglés, Coefficient of Performance (COP), que se define como la razón entre la energía entregada por la bomba de calor y la energía utilizada por la bomba de calor.

$$COP = \frac{\text{energía entregada por la bomba de calor}}{\text{energía utilizada para la operación}} \quad (2.1)$$

Por ejemplo, para un COP de 4, significa que por cada porción de energía eléctrica que

utilizó el compresor, se aprovecharon tres porciones de energía proveniente de la tierra. En la Ilustración 2.5 se representa el sistema completo compuesto por las estructuras termo-activas que están integradas en el circuito primario, por la bomba de calor y por el circuito secundario, y además se muestran los aportes de energía para un COP igual a 4.

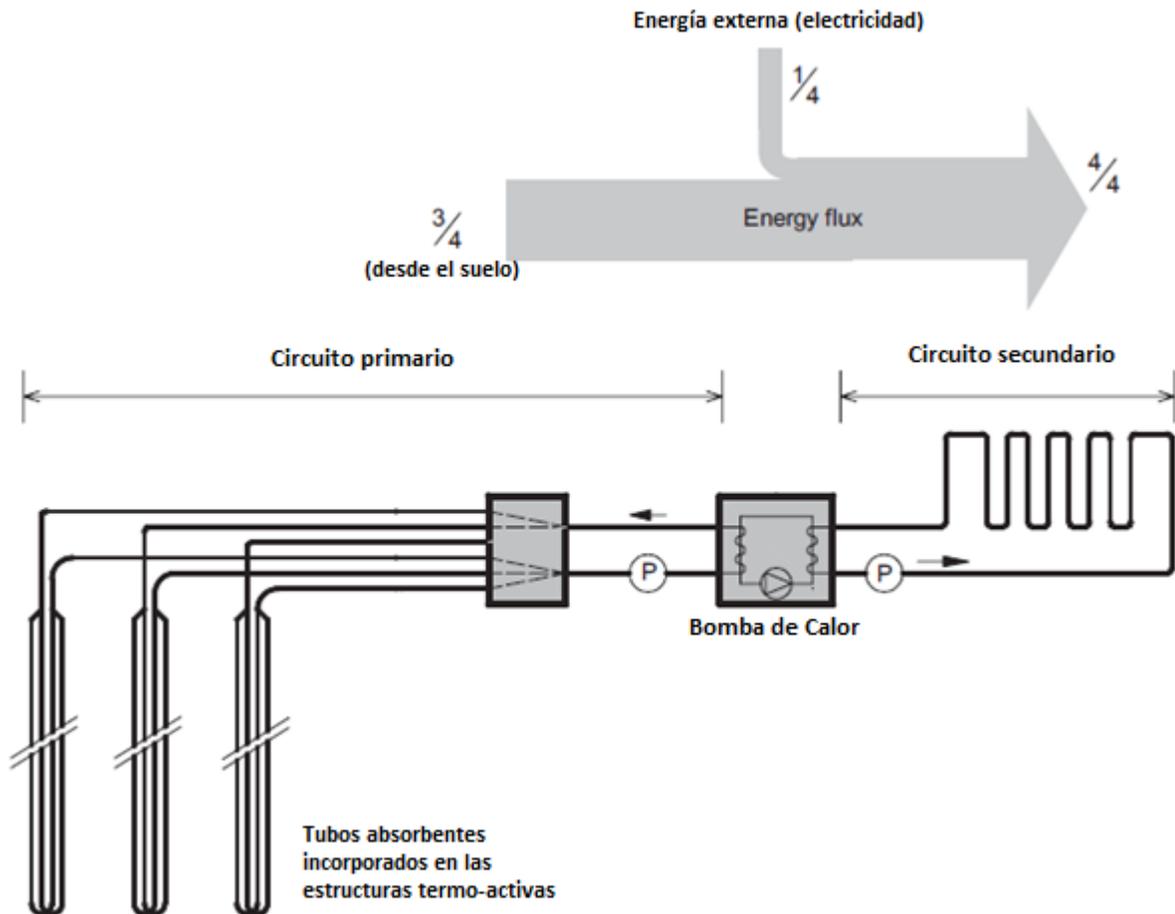


ILUSTRACIÓN 2.5: SISTEMA GEOTÉRMICO. FUENTE: (1)

2.3. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la ciencia que trata de la determinación de las velocidades con que la energía calórica puede transferirse de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura. (5)

El suelo es un sistema que posee múltiples fases por lo que el mecanismo de transferencia de calor es bastante complejo. Las distintas formas de transferencia presentes son.

- a) Conducción
- b) Radiación
- c) Convección
- d) Procesos de vaporización y condensación

- e) Intercambio iónico
- f) Procesos de congelamiento y descongelamiento

En suelos no congelados el mecanismo predominante es la conducción y luego la convección, sin embargo, se puede hacer una simplificación y considerar solo la conducción. (1)

2.3.1. CONDUCCIÓN

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre estas partículas. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases. En los líquidos y gases la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (5)

La velocidad de la conducción de calor, \dot{Q}_{cond} , a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material del que este hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Por lo tanto la velocidad de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT) a través de ésta y al área de transferencia de calor (A), pero inversamente proporcional al espesor de esa capa (Δx).

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor.

La forma diferencial de la formula anterior se llama la ley de Fourier de la conducción de calor y se expresa de la siguiente forma.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Donde $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

2.3.2. CONVECCIÓN

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. (5)

Puede haber convección forzada si el fluido es forzado fluir sobre la superficie solida mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Por otro lado, la convección natural ocurre cuando el fluido se mueve por fuerzas de empuje que son generadas por las diferencias de densidades debidas a las variaciones de temperatura del fluido.

La convección es un proceso complejo de transferencia de calor, sin embargo la rapidez de transferencia de calor por convección, \dot{Q}_{conv} , es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de manera simple por la ley de Newton del enfriamiento.

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_{\infty}) [W] \quad (2.4)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$, A_s es el área superficial a través de la cual se produce la convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido alejado de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido, sino que es un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección.

2.4. ESTRUCTURAS TERMO-ACTIVAS Y TUBOS ABSORBENTES

Las estructuras termo-activas son elementos estructurales que están en contacto permanente con el calor proveniente de la tierra, como las fundaciones de edificios, losas, revestimiento de túneles y anclajes.

Las propiedades físicas y térmicas de los materiales presentes en el sistema estructural termo-activo, específicamente en el túnel que se estudia, se detallan en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1: PROPIEDADES DE MATERIALES PRESENTES EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL TERMO-ACTIVO. FUENTE: (3)

Material	Conductividad Térmica $k \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}\right]$	Capacidad calorífica $\rho \cdot C_p \left[\frac{MJ}{m^3 \cdot ^\circ K}\right]$	Densidad $\rho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Concreto	1,6	1,862	2.049
HDPE	0,42	1,8	960
Aire	0,02	0,0012	1,2
Agua	0,59	4,15	999

Según Brandl (1) se recomienda utilizar tubos absorbentes de plástico de polietileno de alta densidad (HDPE) con un diámetro de 20 a 25 milímetros y un espesor de pared de 2 a 2,4 milímetros.

2.5. TÚNEL LINEA 4 DEL METRO DE SANTIAGO

El Metro de Santiago posee varias líneas de distintas formas, algunas son líneas elevadas, otras superficiales, otras en zanjas y otras subterráneas a través de túneles mineros. El presente estudio se basa en líneas subterráneas a través de túneles mineros, específicamente el túnel de la línea 4 en el tramo que recorre entre estación Tobalaba hasta estación Grecia.

Gracias a Carlos Espinoza, Ingeniero de Vías y RAMS del Metro de Santiago, se tiene información sobre las condiciones ambientales, estructurales y geométricas del túnel entre andenes de la línea. En la Ilustración 2.6 se observa el plano de la vista en corte del túnel y luego en la Tabla 2.1 se resumen los datos obtenidos con el ingeniero y que se utilizarán en el modelo.

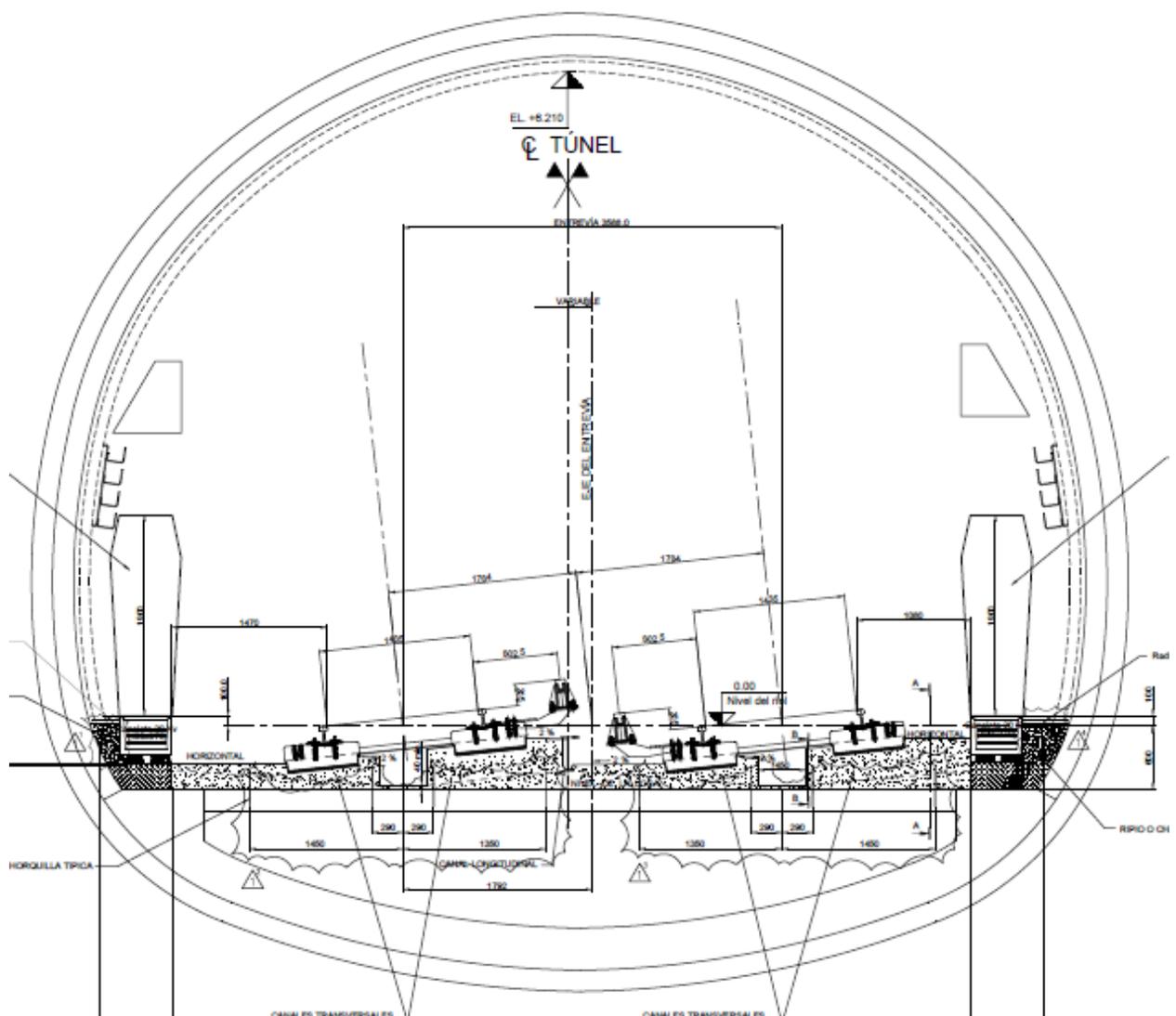


ILUSTRACIÓN 2.6: PLANO DE VISTA EN CORTE DE TÚNEL LINEA 4. FUENTE: METRO S.A.

TABLA 2.2: RESUMEN DE CONDICIONES AMBIENTALES Y ESTRUCTURALES LÍNEA 4. FUENTE: METRO S.A.

Característica	Valor	Unidad
Área sección transversal	51	m^2
Caudal de confort del aire	75	m^3/s
Velocidad de confort del aire	1,47	m/s
Espesor pared concreto	55	cm
Radio curvatura techo	4,9	m
Temperatura media túnel invierno	20	$^{\circ}C$
Temperatura media túnel verano	30	$^{\circ}C$

La *velocidad de confort del aire* es la mínima que debe garantizar el diseño del sistema de ventilación forzada con el que cuentan los túneles del metro. El *área de sección transversal* es el área normal a la dirección del flujo del aire al interior del túnel. El *espesor de la pared de concreto* es el espesor de la estructura que le da resistencia al túnel y está hecha de hormigón armado (con refuerzos de fierro). La *temperatura media del túnel en invierno y verano* son los promedios de temperatura del aire al interior del túnel en las estaciones de invierno y verano.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se detallan los pasos de la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio.

- Determinar las condiciones de operación del sistema.
 - Elegir una ubicación específica para obtener los datos ambientales de temperatura y los datos de las características del suelo de la zona.
 - Estudiar analíticamente la localización adecuada del intercambiador de calor en la estructura del túnel.

- Diseñar el modelo físico de la estructura termo-activa.
 - Establecer la distribución de los tubos absorbentes embebidos en la estructura termo-activa.

- Modelar numéricamente la estructura.
 - Revisión del mallado y análisis de sensibilidad con respecto a la cantidad de elementos.
 - Modelación numérica de la transferencia de calor a través de la estructura mediante el software Comsol.

- Análisis de resultados obtenidos.
 - Revisión de resultados y su comportamiento con respecto al calor transferido, la pérdida de presión dentro de los tubos y aportes de calor del suelo y el túnel.

- Evaluación del rendimiento obtenido.
 - Medir la eficiencia de transferencia de calor por metro de túnel.
 - Medir la reducción de temperatura del aire del túnel a lo largo de él.
 - Revisión de posibles errores que puedan tener los resultados.
 - Análisis de aporte de calor del sistema a la demanda térmica del edificio Beauchef 851.

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. CÁLCULO ANALÍTICO

Primero se estima cual posición es la adecuada para los tubos absorbentes. Una opción es instalar los tubos puestos en la superficie de la estructura solo en contacto con el aire que se encuentra al interior del túnel como se muestra en la mitad derecha de la Ilustración 4.1. Esta es una opción debido a que la temperatura del aire al interior del túnel del Metro es considerable con un promedio de 20°C en invierno y 30°C en verano.

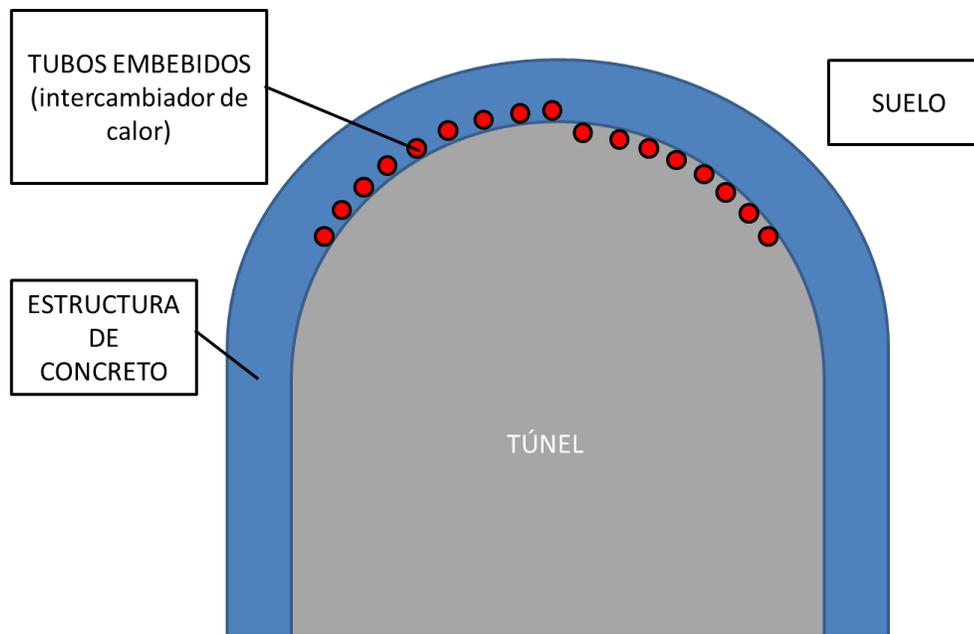


ILUSTRACIÓN 4.1: DIAGRAMA DE UBICACIÓN DE TUBOS ABSORBENTES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La segunda opción es ubicar los tubos absorbentes embebidos en la estructura de concreto como se muestra en la mitad izquierda de la Ilustración 4.1.

Para esto se realiza un cálculo simple unidimensional del flujo de calor que fluye a través de la estructura termo-activa. Solo se considera la transferencia de calor por conducción y convección, y en estado estacionario.

Según el área de proyectos del departamento de geología, en Santiago la temperatura promedio del suelo bajo los 15 metros de profundidad es de 16°C y el material más común que se encuentra es la grava gruesa.

Se toma un espesor de la pared de concreto de 55 centímetros, un diámetro de tubo de 25 milímetros con un espesor de pared de 2,4 milímetros, una temperatura del aire al interior del túnel en verano de 30°C y al interior de los tubos absorbentes circula agua a una temperatura de 5°C. Lo anterior se resume en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1: RESUMEN DE DATOS

Característica	Valor	Unidad
Temperatura suelo	16	°C
Espesor concreto	0,55	m
Diámetro tubo absorbente	25	mm
Espesor pared tubo absorbente	2,4	mm
Temperatura aire del túnel (verano)	30	°C
Temperatura agua de tubos absorbentes	5	°C

4.1.1. CASO TUBOS EMBEBIDOS

- Flujo exterior de tubos

En esta configuración se utilizan tubos de HDPE debido a que son menos frágiles que los tubos de acero utilizados en el caso de tubos no embebidos. De esta manera ante cualquier esfuerzo que se ejerza sobre el tubo resistirá de mejor manera evitando una fractura y fuga de agua.

Para estimar el calor absorbido por el agua se utiliza el factor de forma S para la configuración geométrica mostrada en la Ilustración 4.2 que consiste en los tubos de diámetro D separados entre si a una distancia L con una temperatura exterior del tubo T_1 insertados dentro del material de concreto de espesor $2z$ con temperatura externa T_2 .

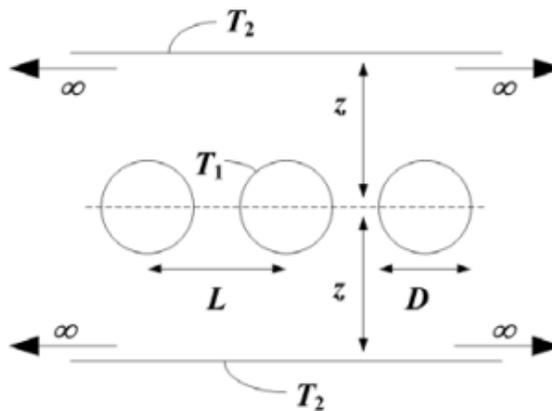


ILUSTRACIÓN 4.2: CONFIGURACION PARA FACTOR DE FORMA S

El calor transferido desde el exterior del materia hacia la pared externa del tubo se calcula con la ecuación (4.1).

$$q_{ext} = Sk(T_2 - T_1) \quad (4.1)$$

Donde S es el factor de forma y esta definido por la ecuación (4.2).

$$S = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{2L}{\pi D} \sinh\left(\frac{\pi z}{L}\right)\right)} \quad (4.2)$$

Para $z > D$.

Con $L = 0,3 [m]$ y $z = \frac{55}{2} [cm]$.

Como el factor de forma considera una misma temperatura por los dos lados del concreto se toma el promedio entre la temperatura del aire del túnel y la temperatura de la tierra igual a $T_2 = \frac{16+30}{2} = 23^\circ C$.

Luego la temperatura de la pared del tubo será ajustada por Excel al resolver con solver por lo que se toma una temperatura cualquiera igual a $T_1 = 12^\circ C$.

- Flujo interior del tubo

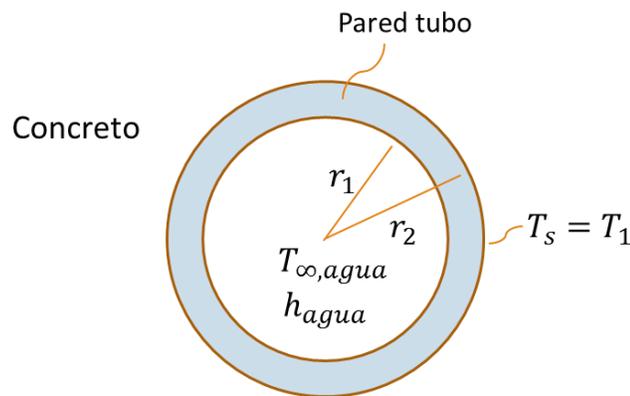


ILUSTRACIÓN 4.3: ESQUEMA DE DISTANCIAS Y TEMPERATURAS DEL TUBO

Como se puede ver en la Ilustración 4.3 el tubo tiene un radio interno r_1 , un radio externo r_2 y una temperatura de la pared externa T_s igual a la temperatura T_1 vista más arriba.

El flujo al interior del tubo tiene una temperatura $T_{\infty, agua} = 5^\circ C$ y un coeficiente convectivo $h_{agua} = \frac{4,36k}{D}$ para un flujo de calor constante $q_s = cte$. D es el diámetro hidráulico y k es la conductividad del agua. Por lo tanto el coeficiente convectivo es igual a $h_{agua} = 126,09 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

Luego el flujo de calor desde la pared externa del tubo hacia el agua está dado por la ecuación (4.3).

$$q_{int} = \frac{T_s - T_{\infty, agua}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{agua} 2\pi r_1 L}} \quad (4.3)$$

Luego para resolver el problema se utiliza el solver de Excel donde se varía la temperatura T_1 para que los flujos de calor externo e interno sean iguales $q_{ext} = q_{int} = q$.

Finalmente se obtiene una temperatura de pared exterior del tubo $T_1 = 10,9^\circ\text{C}$ y un calor transferido por metro de tubo de $q = 28,79 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right]$.

4.1.2. CASO TUBOS NO EMBEBIDOS

El caso de tubos no embebido considera que los tubos están solo en contacto con el aire del túnel por lo que se estima el calor transferido desde el aire caliente a 30°C hacia el agua del tubo a 5°C .

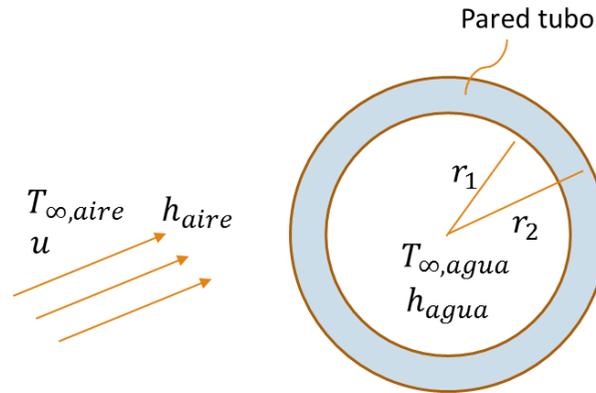


ILUSTRACIÓN 4.4: ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL TUBO EN CONTACTO CON EL AIRE

Como se puede ver en la Ilustración 4.4 el aire rodea el tubo con una velocidad u y una temperatura $T_{\infty, \text{aire}} = 30^\circ\text{C}$, transfiere calor al agua del interior del tubo que se encuentra a una temperatura $T_{\infty, \text{agua}} = 5^\circ\text{C}$ a través de la pared del tubo de acero de 2,4 milímetros de espesor y 25 milímetros de diámetro.

El flujo exterior del tubo transfiere el calor por convección a la pared exterior del tubo por lo que se calcula el coeficiente convectivo del aire con la correlación de Churchill y Bernstein de la ecuación (4.4) para calcular el número de Nusselt

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (4.4)$$

Donde el número de Prandl del aire es $Pr = 0,7296$ y el número de Reynolds se calcula con la ecuación (4.5).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4.5)$$

Con una viscosidad cinemática del aire $\nu = 0,00001562 \text{ [m}^2/\text{s]}$.

Como el número de Reynolds depende la velocidad del flujo de aire, se estima dicha velocidad en las cercanías de la pared del túnel donde se encontrarían instalados los tubos.

El perfil de velocidades del aire dentro del túnel es como se muestra en la Ilustración 4.5. Para calcular la velocidad en las cercanías de la pared se utiliza la ecuación (4.6) asumiendo que el flujo de aire dentro del túnel es lo mismo que un flujo de aire dentro de una tubo de diámetro muy grande.

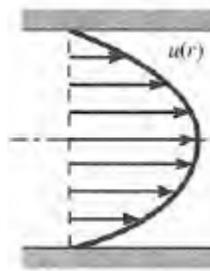


ILUSTRACIÓN 4.5: PERFIL DE VELOCIDAD DE UN FLUJO INTERNO

$$u(r) = 2u_m \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Por lo tanto para un radio cercano a r_0 (cerca de la pared del túnel) y una velocidad media del aire $u_m = 1,47 [m/s]$ se tiene que la velocidad cerca de la pared es de 0,04 m/s.

$$u(r \approx r_0) = 0,04 \frac{m}{s}$$

Luego el número de Nusselt es igual a $Nu = 4,425445$.

Además el Nusselt se puede calcular con la ecuación (4.7) donde se puede despejar el coeficiente convectivo del aire y se obtiene un valor igual a $h_{aire} = 4,51 \left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right]$

$$Nu = \frac{h_{aire} D}{k} \quad (4.7)$$

El coeficiente convectivo del agua al interior del tubo es igual al calculado en el de tubos embebido por lo que es igual a $h_{agua} = 126,09 \frac{W}{m^2 \cdot C}$.

El tubo utilizado en este caso es de acero para mejorar la conductividad a través de su pared ya que tiene una coeficiente de conductividad igual a $k_{acero} = 64 \frac{W}{m \cdot C}$.

Finalmente con la ecuación (4.8) se obtiene un calor transferido por metro de tubo igual a $q = 8,48 \left[\frac{W}{m} \right]$.

$$q = \frac{T_{\infty,aire} - T_{\infty,agua}}{\frac{1}{h_{aire}2\pi r_2 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{agua}2\pi r_1 L}} \quad (4.8)$$

Por lo tanto comparando el caso de tubos embebidos donde se obtuvo un flujo de $28,79 \left[\frac{W}{m}\right]$, con el caso de tubos no embebidos donde se obtuvo un flujo de $8,48 \left[\frac{W}{m}\right]$, conviene utilizar la configuración de tubos embebidos en el concreto del túnel.

4.2. DISEÑO DEL MODELO EN COMSOL

El modelo diseñado en Comsol 4.3 está basado en las dimensiones del plano entregado por el ingeniero del Metro de Santiago que se muestra en la Ilustración 2.6. No es exactamente igual pero es una buena aproximación.

4.2.1. GEOMETRÍA DEL TÚNEL

El modelo consta de dos cuerpos principales, el suelo y el concreto, y el serpentín que se encuentra embebido en el concreto. En la Ilustración 4.6 se muestran las distintas partes y sus dimensiones principales, el suelo se destaca en color naranja y la estructura de concreto en color celeste. El interior del túnel por donde circulan los trenes tiene un ancho de 8,4 metros y una altura máxima en su centro de 6,3 metros. El espesor de la estructura de concreto en color celeste es de 55 centímetros, y el suelo tiene un espesor máximo en su base de 5 metros y un mínimo de 2,9 metros en la parte más alta.

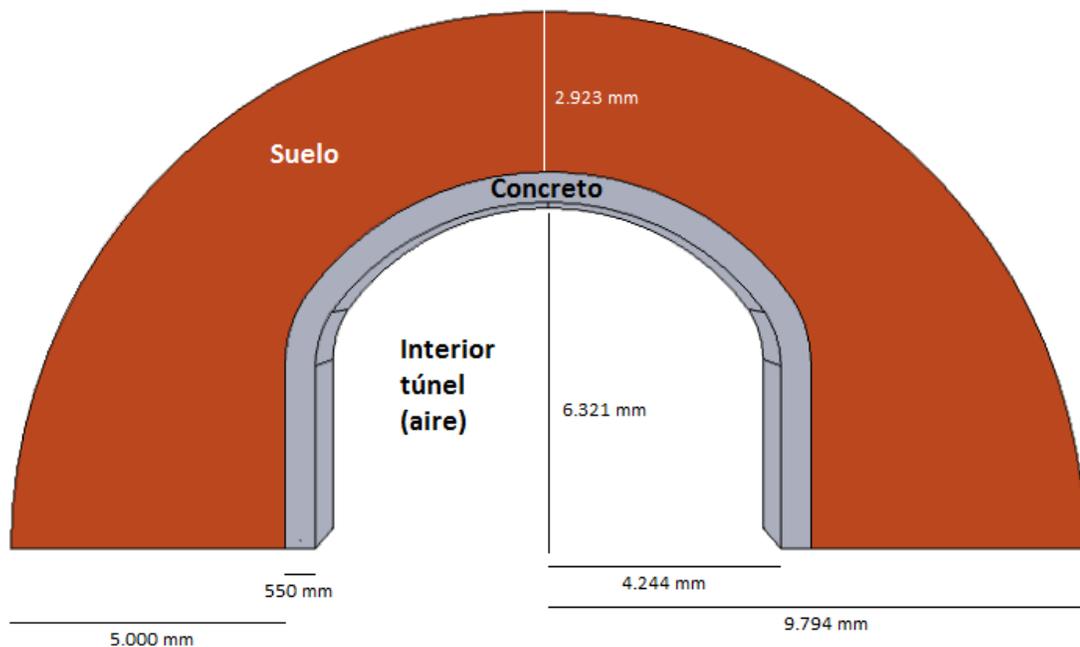


ILUSTRACIÓN 4.6: PARTES DEL MODELO DEL TÚNEL

En la Ilustración 4.7 se observan los cuerpos del modelo en vista isométrica y se muestra la dirección del flujo forzado de aire al interior del túnel que circula a 1,47 m/s.

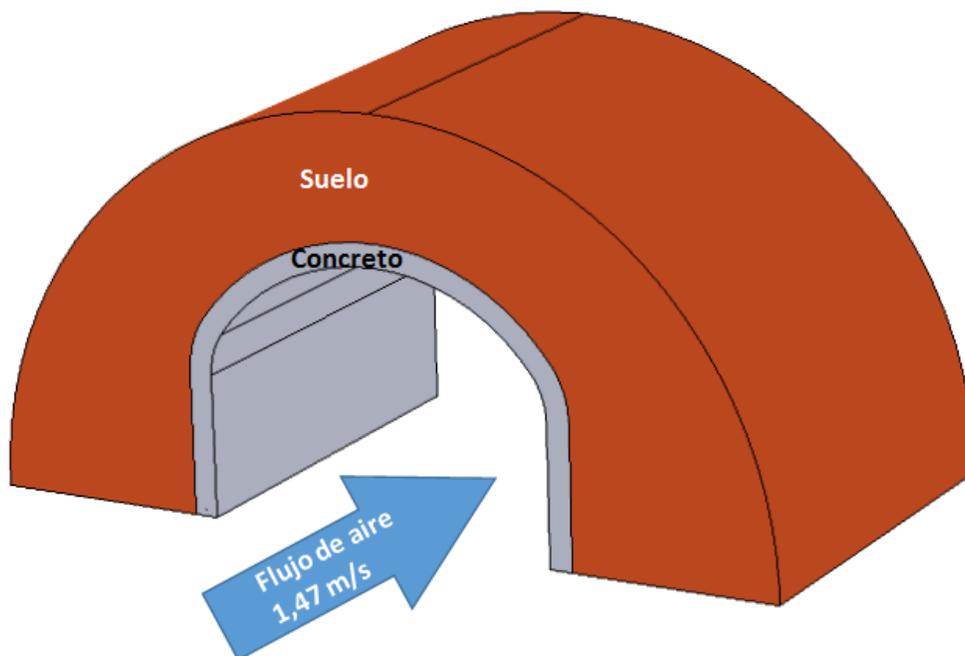


ILUSTRACIÓN 4.7: PARTES DEL TÚNEL VISTA ISOMÉTRICA

Las propiedades de los materiales que se utilizan se resumen en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2: PROPIEDADES DE MATERIALES. FUENTE: (3).

Propiedad	Material		
	Suelo	Concreto	Tubo HDPE
Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0,52	1,6	0,42
Calor específico $\left[\frac{J}{Kg \cdot K}\right]$	1840	908,736	1875
Densidad $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	2000	2049	960

Las propiedades de concreto y los tubos de HDPE se obtienen de la norma del uso termal del suelo de la Asociación Alemana de Ingenieros (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE) (3), y las propiedades del suelo se obtienen con el área de proyectos del departamento de Geología de la Universidad de Chile correspondientes a un suelo de grava gruesa presente en la ciudad de Santiago.

4.2.2. CONFIGURACION DE TUBOS

Respecto al serpentín por donde circula el agua que absorbe calor, se evalúan dos configuraciones distintas, una de tubos paralelos instalados dentro de la estructura de concreto en dirección axial, es decir, en la misma dirección en que circulan los trenes del Metro. La configuración de tubos paralelos se muestra en la Ilustración 4.8 donde se

observan en color azul 64 tubos de 30 metros cada uno a lo largo del túnel. Cada tubo tiene la entrada de agua fría por un lado y la salida de agua caliente por el otro.

La otra configuración consta de un solo tubo que recorre en forma de zig-zag un tramo de 10 metros de túnel como se puede ver en la Ilustración 4.9. En este caso hay una sola entrada de agua fría y una sola salida de agua caliente.

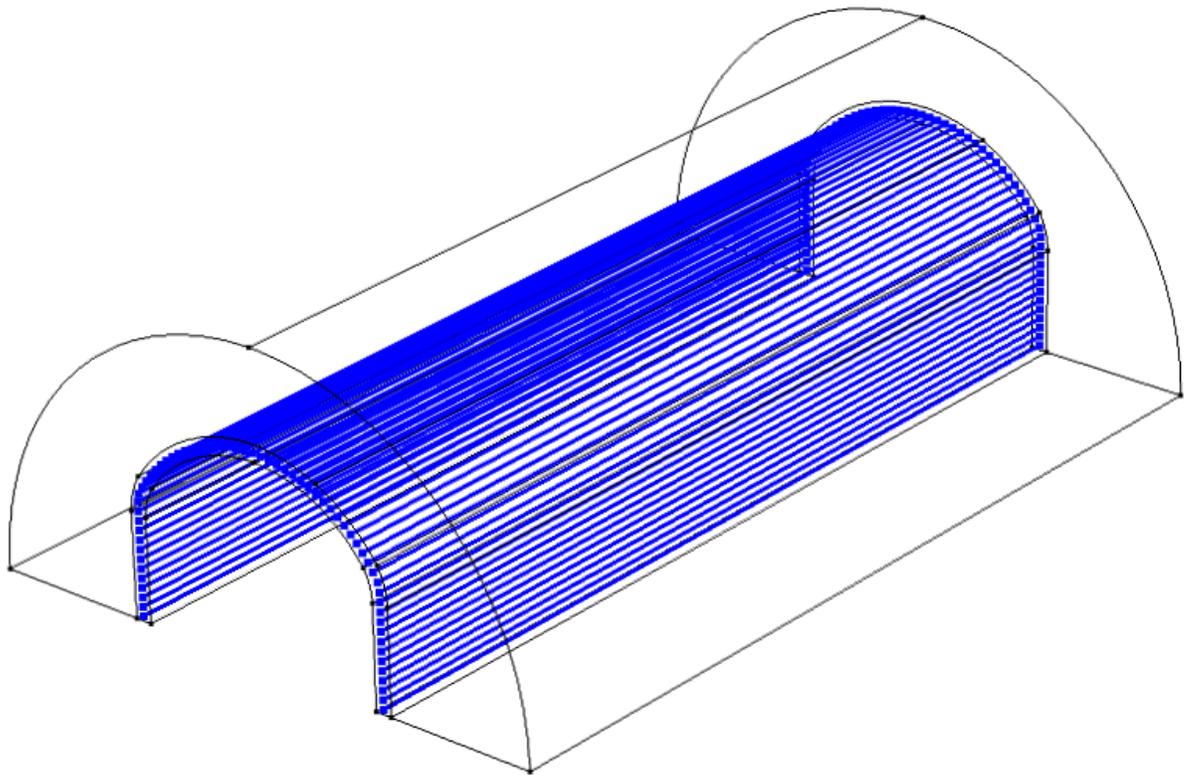


ILUSTRACIÓN 4.8: CONFIGURACIÓN DE TUBOS PARALELOS

Después de hacer simulaciones rápidas con cada una de las configuraciones, se decide utilizar la última configuración de tubos en forma de zig-zag principalmente por un tema constructivo. Para lograr absorber una buena cantidad de calor y obtener una variación de temperatura considerable con la configuración de tubos paralelos, se necesitan por lo menos 100 metros de tubos, es decir, habría que instalar los tubos en un tramo de cien metros de túnel. En la práctica esto no es posible ya que en la fabricación de túneles las estructuras de concreto se van construyendo por tramos cortos a medida que se avanza en el cavado sin poder esperar que se caven 100 metros para instalar los tubos y luego rellenar con concreto. En cambio la configuración de tubos en zig-zag es más modular, por lo que se instalan los serpentines cada 10 metros de avance.

Además, desde el punto de vista del mantenimiento de los tubos, en caso de falla de un tubo en la configuración de tubos paralelos habría que cortar la circulación de todos los tubos en un tramo de 100 metros. En cambio con la configuración de zig-zag, en caso de falla habría que cortar el flujo solo en un tramo de 10 metros de túnel.

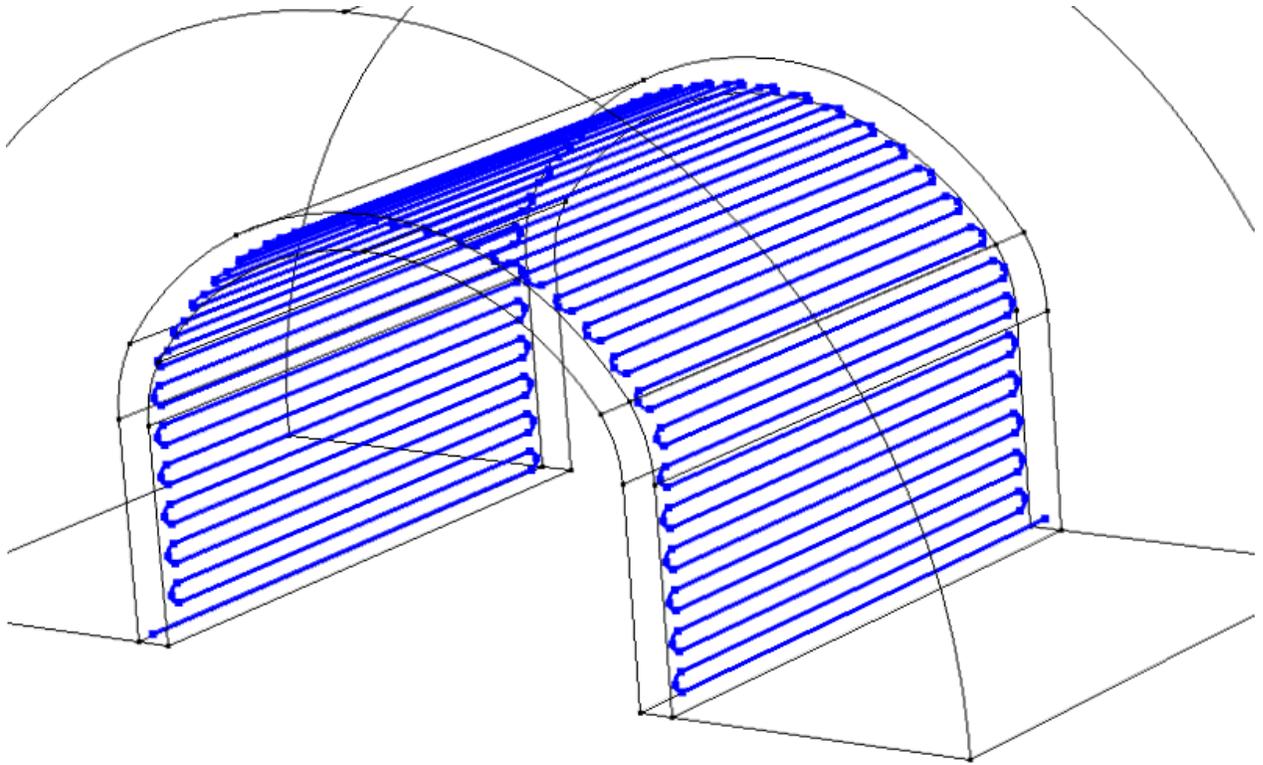


ILUSTRACIÓN 4.9: CONFIGURACIÓN DE TUBOS EN FORMA DE ZIG-ZAG



ILUSTRACIÓN 4.10: CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO

En la Ilustración 4.10 se observa la construcción del hormigón armado con los refuerzos de fierro y los moldajes listos para que sea vertido el concreto. Es importante,

según Brandl (1), presurizar con aire los serpentines para evitar que la presión generada por el propio peso del concreto líquido haga colapsar los tubos en las partes más bajas de las paredes laterales.

4.2.3. MODULOS DE COMSOL UTILIZADOS

Los módulos de Comsol utilizados para el sistema en estado estacionario son dos, el que modela la transferencia de calor a través de los cuerpos del suelo y concreto llamado Heat Transfer in Solids (transferencia de calor en solidos), y el que modela la transferencia de calor a través del tubo hacia el fluido refrigerante llamado Non-Isothermal Pipe Flow (flujo no isotérmico en tuberías).

Cada módulo se rige por ecuaciones características que se detallan a continuación.

4.2.3.1. HEAT TRANSFER IN SOLIDS (TRANSFERENCIA DE CALOR EN SOLIDOS)

La transferencia de calor dentro del dominio del suelo y de la estructura de concreto está gobernada por la conducción con la ecuación (4.9).

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} \right) = \nabla \cdot k \nabla T_2 \quad (4.9)$$

Donde T_2 es la temperatura del sólido, k es el coeficiente conductivo del sólido y ρ es la densidad del sólido.

4.2.3.2. NON-ISOTHERMAL PIPE FLOW (FLUJO NO ISOTERMAL EN TUBERIAS)

La transferencia del calor dentro de los tubos es un poco más compleja ya que hay transferencia por conducción y por convección además del movimiento del fluido.

El flujo dentro de los tubos está gobernado por las ecuaciones (4.10) y (4.11) de momento y conservación de masa.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) = -\nabla p - f_D \left(\frac{\rho}{2d_h} \right) \mathbf{u} |\mathbf{u}| \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.11)$$

Donde \mathbf{u} es la velocidad promedio del fluido en [m/s], A es el área de la sección transversal de la tubería en [m^2], ρ es la densidad en [Kg/m^3], y p es la presión en N/m^2 .

El segundo término del lado derecho de la ecuación (4.10) corresponde a la caída de presión debido a la viscosidad del fluido. Comsol utiliza el modelo de fricción de Churchill para calcular f_D el cual es válido para flujos laminares, de transición y turbulentos. La fricción se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$f_D = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (4.12)$$

Donde:

$$A = \left[-2,457 \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \left(\frac{e}{d} \right) \right) \right]^{16} \quad (4.13)$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (4.14)$$

Por lo tanto el factor de fricción depende de la rugosidad superficial dividida por el diámetro del tubo. Se utiliza la rugosidad para plásticos igual a $e = 0,0015$ [mm].

Con el modelo de Churchill, f_D también está en función de las propiedades del fluido, de la de flujo y de la geometría del ducto, a través del número de Reynolds descrito por la ecuación (4.15).

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (4.15)$$

Las propiedades del agua son automáticamente asignadas por Comsol dependiendo de la temperatura a la que se encuentre.

La ecuación de energía para el agua del serpentín es la siguiente.

$$\rho A C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho A C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k \nabla T + f_D \left(\frac{\rho A}{2 d_h} \right) |\mathbf{u}|^3 + Q_{wall} \quad (4.16)$$

Donde C_p es el calor específico a presión constante en [J/Kg°K], T es la temperatura del agua en [°K], y k es el coeficiente de conductividad en [W/m°K]. Q_{wall} es un término del calor intercambiado con el entorno del fluido, en este caso el dominio del concreto.

Este calor intercambiado, Q_{wall} en [W/m] acoplado a los dos balances de energía de las ecuaciones (4.9) y (4.16) entrega el calor transferido a través de la pared del tubo con la siguiente ecuación.

$$Q_{wall} = hZ(T_{ext} - T) \quad (4.17)$$

Donde Z está en [m] y corresponde al perímetro del tubo, h está en [W/m²°K] y es el coeficiente convectivo, y T_{ext} es la temperatura del exterior del tubo en [°K].

El coeficiente convectivo h depende de las propiedades físicas del agua y de la naturaleza del flujo y el calculado desde el número de Nusselt de la ecuación (4.18).

$$h = Nu \frac{k}{d_h} \quad (4.18)$$

Donde k es la conductividad del material, Nu es el número de Nusselt, y d_h es el diámetro hidráulico de la tubería.

Comsol detecta automáticamente si el flujo es laminar o turbulento. Para flujos laminares en tubos circulares el número de Nusselt es $Nu = 3,66$. Para flujos turbulentos en tubos circulares se usa la correlación de la ecuación (4.19).

$$Nu_{int} = \frac{\left(\left(\frac{f_D}{8}\right)(Re - 1000)Pr\right)}{1 + 12,7\left(\frac{f_D}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (4.19)$$

Donde: Pr es el número de Prandtl.

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (4.20)$$

4.2.4. CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde impuestas en el modelo son las siguientes.

4.2.4.1. TEMPERATURA CONSTANTE DEL SUELO

El borde curvo exterior del suelo, que se muestra en azul en la Ilustración 4.11, tiene una temperatura constante de 16°C . De esa manera se simula la temperatura constante que posee el suelo en el infinito. Por lo mismo el espesor del suelo es lo suficientemente grueso para que no haya errores en el cálculo. Por lo tanto el suelo actúa como una fuente o un sumidero de calor inagotable con una temperatura invariable de 16°C .

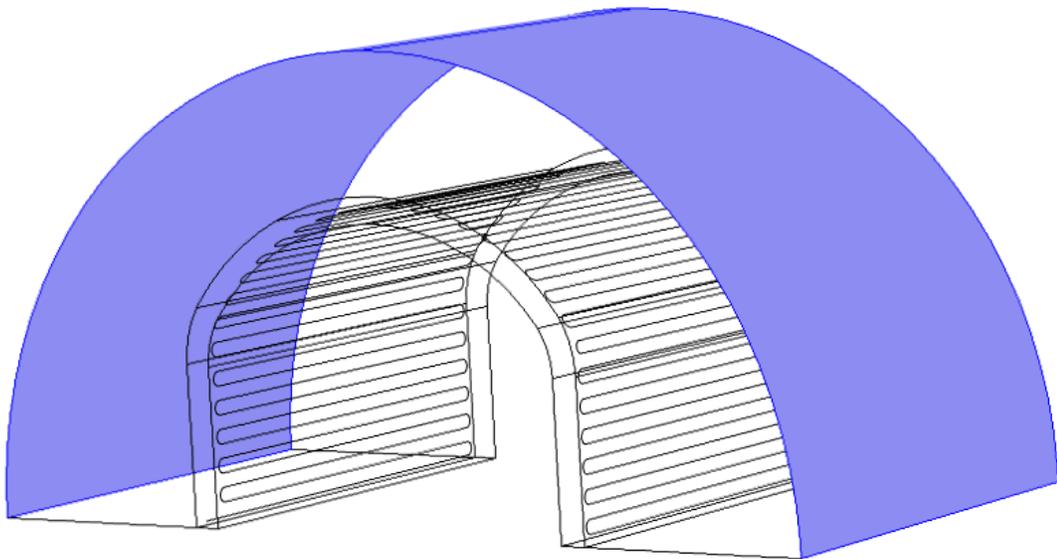


ILUSTRACIÓN 4.11: BORDE DE SUELO CON TEMPERATURA CONSTANTE

4.2.4.2. BORDES ADIABÁTICOS

Los bordes adiabáticos se utilizan para los bordes que son caras de simetría, este es el caso de las caras que se ven destacadas en azul en la Ilustración 4.12.

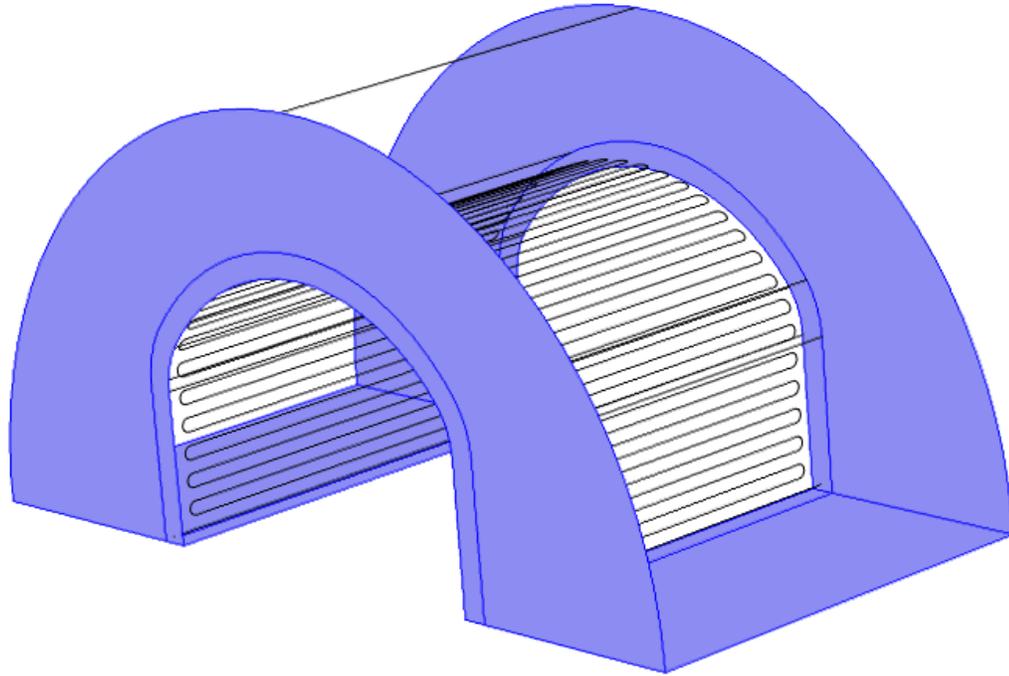


ILUSTRACIÓN 4.12: BORDES ADIABÁTICOS

Los bordes adiabáticos con forma de herradura son caras de simetría ya que el modelo considera que a continuación de esas caras hay instalados serpentines idénticos.

4.2.4.3. FLUJO DE CALOR CONVECTIVO

En la cara interior de la estructura de concreto, destacada en azul en la Ilustración 4.13, se impone un flujo de calor proveniente de la convección generada por el flujo forzado de aire al interior del túnel. Específicamente, el aire más caliente que el concreto transfiere calor por convección a este último. Dicha superficie tiene un área de transferencia de calor de 179 metros cuadrados.

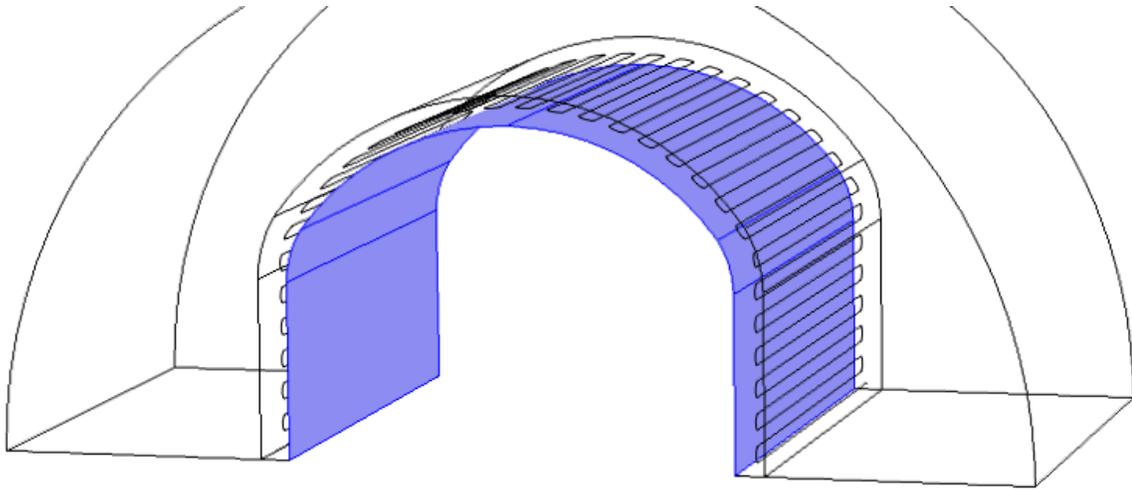


ILUSTRACIÓN 4.13: BORDE CON FLUJO DE CALOR CONVECTIVO

La función utilizada en Comsol es la que simula la convección forzada externa sobre una placa, por lo que se asume al borde interior del concreto como una placa plana sobre la cual fluye aire a una temperatura y velocidad constante. De esa manera el software calcula el coeficiente convectivo (h) promedio sobre la superficie. Para dicho cálculo es necesario especificar un largo característico de placa por lo que se establece un largo de 20 metros para disminuir la incidencia del flujo laminar sobre el cálculo del coeficiente convectivo promedio. Esto debido a que la transferencia de calor sobre placas es menor en régimen laminar que en régimen turbulento.

Para saber sobre que porción de la placa hay régimen laminar y turbulento se calcula la distancia crítica (x_{cr}) en la cual el flujo pasa de laminar a turbulento con la ecuación (4.21).

$$Re_{cr} = \frac{Vx_{cr}}{\nu} \quad (4.21)$$

Donde V es la velocidad del flujo de aire sobre la placa, ν es la viscosidad cinemática del aire, y Re_{cr} es el Reynolds crítico para el cual hay cambio de régimen y es igual a 5×10^5 .

La distancia crítica es de 4,93 metros por lo cual sobre una placa de 20 metros de largo hay régimen turbulento sobre el 75% de ella.

Además para comprobar que el largo de la placa es adecuado se comparan las temperaturas de salida del agua de los tubos para placas de 10, 20 y 50 metros de largo. Para lo anterior se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4.3.

TABLA 4.3: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LARGO DE PLACA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Largo de placa [m]	Temperatura de salida de agua [°K]
10	291,62
20	291,29
50	291,27

Se observa que la variación de temperaturas entre las placas de 20 y 50 metros es de dos centésimas de grado kelvin lo cual es bastante menor que la variación entre las placas de 10 y 20 metros. Por esto se justifica utilizar un largo de placa de 20 metros.

4.2.5. MALLADO

El mallado en Comsol utiliza elementos de forma tetraédrica y se realiza de manera automática, solo se debe seleccionar el nivel de refinamiento de la malla. Los distintos niveles de refinamiento en orden de más grueso a más fino son extremely coarse, extra coarse, coarser, coarse, normal, fine, finer, extra fine y extremely fine.

Para verificar la calidad del mallado se hace un análisis de sensibilidad comparando la temperatura de salida del agua del serpentín con respecto a la cantidad de elementos. Para esto se generan mallas con cada uno de los niveles de refinamiento, excepto con los niveles extremely coarse y extra coarse ya que el sistema no converge para las mallas más gruesas. Los valores del análisis se resumen en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MALLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Nivel de mallado	Cantidad de elementos	Temperatura de salida [°K]
Coarser	7.932	291,36
Coarse	11.701	291,36
Normal	18.699	291,35
Fine	52.788	291,33
Finer	124.183	291,32
Extra fine	366.293	291,31
Extremely fine	847.953	291,29

En la Ilustración 4.14 se observa el gráfico del análisis de sensibilidad de la malla en el cual se aprecia que a medida que aumenta la cantidad de elementos del mallado, la variación de la temperatura de salida del agua va disminuyendo. A pesar de que no se observa que la variación tienda a cero, las diferencias de temperaturas son de centésimas de grado Celsius por lo que prácticamente la temperatura es constante. Como no se tiene una independencia total del número de elementos de la malla se utiliza el mallado más fino, el extremely fine, que está compuesto por 847.953 elementos tetraédricos. En el desarrollo que continúa se analizan distintos casos donde cada uno tiene una cantidad distinta de elementos por lo que en cada caso se detalla dicho número.

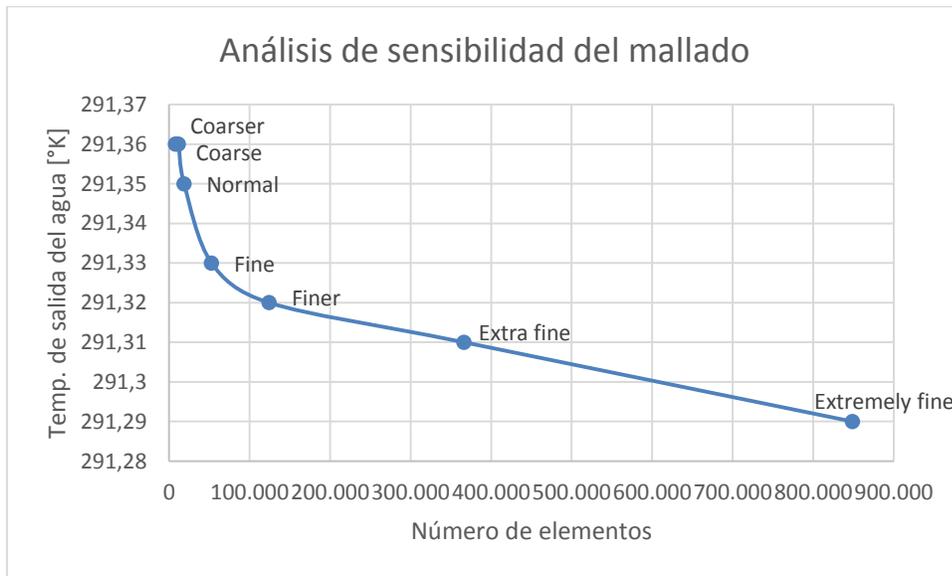


ILUSTRACIÓN 4.14: GRÁFICO DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MALLA

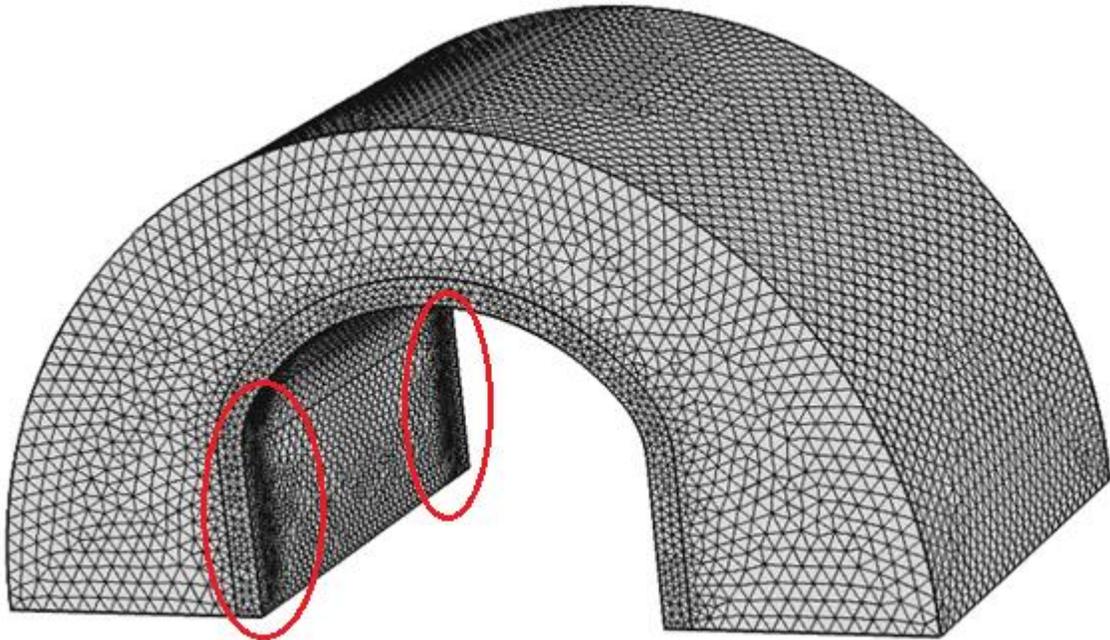


ILUSTRACIÓN 4.15: MALLADO DEL MODELO CON NIVEL EXTREMELY FINE

En la Ilustración 4.15 se observa el mallado resultante donde el dominio del suelo tiene elementos más grandes y el dominio de concreto tiene elementos más pequeños principalmente porque dentro de ese dominio se ubican los tubos que tiene un diámetro de 25 milímetros. También se observa que en las caras comunes entre el suelo y el concreto hay una buena transición. Además en las zonas destacadas con círculos rojos, se puede ver un mallado mucho más fino que el resto de elementos. Esto se debe a que en esas zonas dentro del concreto se ubican las vueltas de los tubos, lo que hace que en zonas curvas el mallado deba ser más fino para mantener elementos de buena calidad.

Las principales características del mallado utilizado se resumen en la Tabla 4.5

TABLA 4.5: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MALLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Característica	Valor
Número de elementos	847.953
Promedio de calidad de elementos	0,7334
Promedio de tasa de crecimiento	1,741
Volumen del suelo [m^3]	927,6
Volumen del concreto [m^3]	103,6

4.3. MODELACIÓN

El objetivo del modelo es absorber a través del agua fría que circula por el serpentín embebido en la estructura de concreto, el calor disponible en dos zonas. Uno es el calor aportado por el suelo y otro es el calor aportado por el aire que circula dentro del túnel.

A continuación se presentan las diferentes modelaciones hechas donde se simulan dos estaciones del año, invierno y verano, con lo cual varía la temperatura del aire al interior del túnel del Metro. Además se simulan tres configuraciones distintas del serpentín en forma de zig-zag donde se varía la separación de los tubos del serpentín para 30, 50 y 70 centímetros de separación. Y para cada uno de estos casos se varía la velocidad del flujo de agua al interior del túnel para 10, 20, 30, 40 y 50 centímetros por segundo.

4.3.1. CRITERIOS Y DATOS DE ENTRADA

- El modelamiento en Comsol se hace para un estado estacionario.
- El agua siempre absorberá calor desde el aire del túnel y del suelo por lo que en las entradas de los tubos siempre ingresa agua helada.
- Las estaciones del año modeladas son invierno y verano para poder estudiar el peor de los casos en invierno y el mejor de los caso en verano. Según los datos entregados por el ingeniero del Metro Carlos Espinoza (6) el invierno es el peor de los casos debido a que la temperatura promedio del aire al interior del túnel es la menor del año con un promedio de 20°C. En cambio el verano es el mejor de los casos con mayor calor disponible ya que el interior del túnel alcanza un promedio máximo de temperatura de 30°C.

TABLA 4.6: TEMPERATURAS DEL AIRE DEL TÚNEL PARA INVIERNO Y VERANO. FUENTE: (7).

Temperatura promedio del aire al interior del túnel	
Invierno	20°C
Verano	30°C

- El túnel de la línea 4 del Metro se encuentra a una profundidad de 30 metros o más en algunas partes, por lo que la temperatura del suelo a esa profundidad es constante y es de 16°C.
- La Norma IGSHPA (2009) (8) define temperaturas máximas y mínimas del fluido que ingresa a una bomba de calor. Define un mínimo de -4°C y un máximo de 35°C. En este caso se utiliza agua como fluido circulante a través de los tubos y bomba de calor, por lo que se debe utilizar una temperatura de entrada a los tubos mayor al punto de congelación del fluido.

TABLA 4.7: RANGO RECOMENDADO DE TEMPERATURAS DE INGRESO A BOMBA DE CALOR. FUENTE: (8).

Temperatura de ingreso a una bomba de calor	
Máxima	-4°C
Mínima	35°C

- Por conservación ambiental la Norma VDI 4640 (3) recomienda una variación de temperatura del fluido de los tubos de $\pm 11^\circ\text{C}$ con respecto a la temperatura del suelo, en este caso 16°C. Por lo anterior se establece en la entrada de los tubos una temperatura 5°C.

TABLA 4.8: RANGOS DE TEMPERATURAS DEL FLUIDO PARA UN SUELO A 16°C. FUENTE: (3)

Temperaturas recomendadas del fluido para un suelo a 16°C	
Máxima	27°C
Mínima	5°C

- Los requerimientos de diseño del túnel del Metro de Santiago (7) establece la instalación de ventiladores para asegurar una ventilación forzada mínima. Dicha ventilación debe asegurar una velocidad de flujo del aire al interior del túnel de 1,47 m/s. Dicho valor es utilizado en la simulaciones.

4.3.2. CASOS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones que se realizan se muestran en el esquema de la Tabla 4.9 donde se observa que se realizan 30 modelaciones distintas las cuales son revisadas a continuación.

TABLA 4.9: CASOS SIMULADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos	Velocidad del flujo de agua
Invierno (Aire del túnel a 20°C)	30 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]
	50 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]
	70 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]
Verano (Aire del túnel a 30°C)	30 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]
	50 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]
	70 [cm]	0,1 [m/s]
		0,2 [m/s]
		0,3 [m/s]
		0,4 [m/s]
		0,5 [m/s]

Básicamente hay tres geometrías distintas diseñadas en Comsol en las cuales varia la separación de los tubos, el resto de las variables como la temperatura del aire al interior del túnel en invierno y verano, y la velocidad del flujo de agua al interior de los tubos se modifican fácilmente como un dato de entrada dentro de cada modelo.

A continuación se revisan las características principales de cada geometría como el mallado y la longitud total del serpentín.

4.3.2.1. GEOMETRÍA CON SEPARACIÓN DE 30 CENTÍMETROS

Esta geometría es la con más metros de tubos instalados en la estructura de concreto con un largo total de 578,5 metros, posee 64 tubos paralelos con una separación de 30 centímetros y unidos entre ellos por sus extremos como se puede ver en la Ilustración 4.16. En las tres geometrías distintas los tubos se ubican en la mitad del espesor de la estructura de concreto.

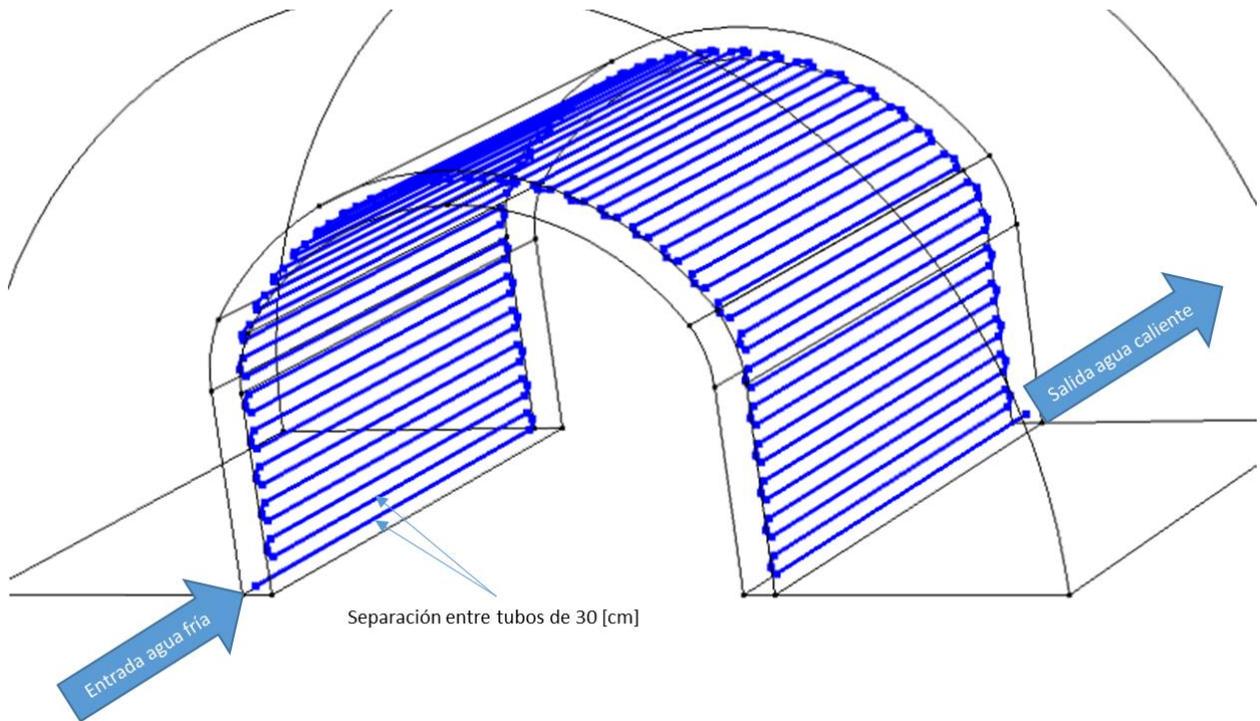


ILUSTRACIÓN 4.16: SERPENTÍN DE TUBOS CON SEPARACIÓN DE 30 CENTÍMETROS

El mallado de la geometría con separación de tubos de 30 centímetros tiene 847.953 elementos tetraédricos con un promedio de calidad de los elementos de 0,7334. El promedio de la tasa de crecimiento de los elementos es 1,741. El mallado resultante se puede ver en la Ilustración 4.17. Esta geometría es la que posee mayor cantidad de elementos debido a que es la que tiene más metros de tubo embebido en el concreto. Esto obliga a la malla a refinar más elementos que están alrededor de los tubos. Por lo anterior también se tiene la peor calidad de elementos.

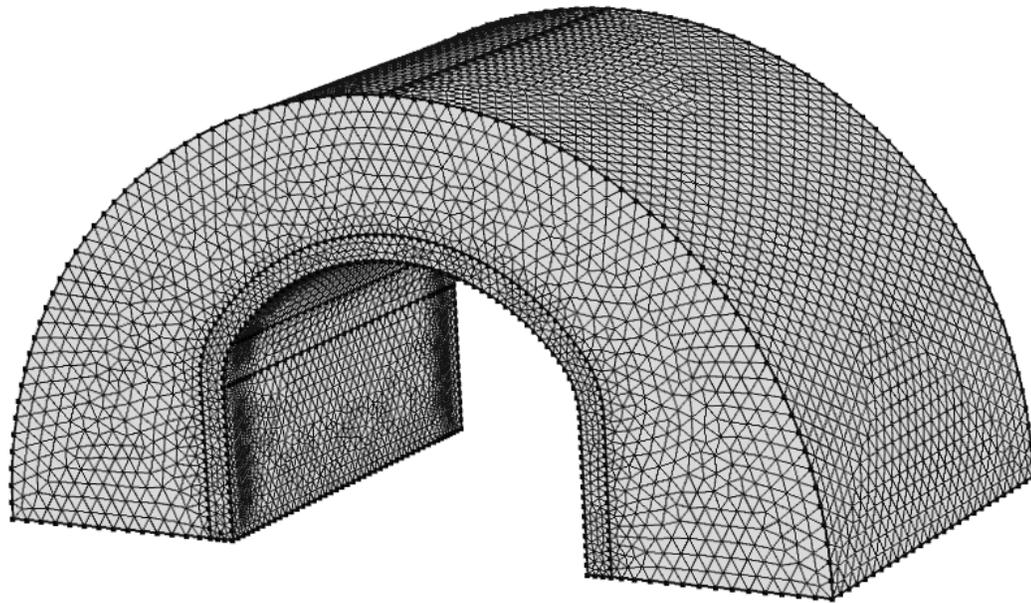


ILUSTRACIÓN 4.17: MALLADO PARA GEOMETRÍA CON SEPARACION DE TUBOS DE 30 CENTÍMETROS

4.3.2.2. GEOMETRÍA CON SEPARACIÓN DE 50 CENTÍMETROS

Esta geometría tiene una longitud mediana del serpentín embebido en la estructura de concreto con respecto a las otras dos geometrías. El serpentín tiene un largo total de 345 metros, posee 38 tubos paralelos con una separación de 50 centímetros y unidos entre ellos por sus extremos como se puede ver en la Ilustración 4.18.

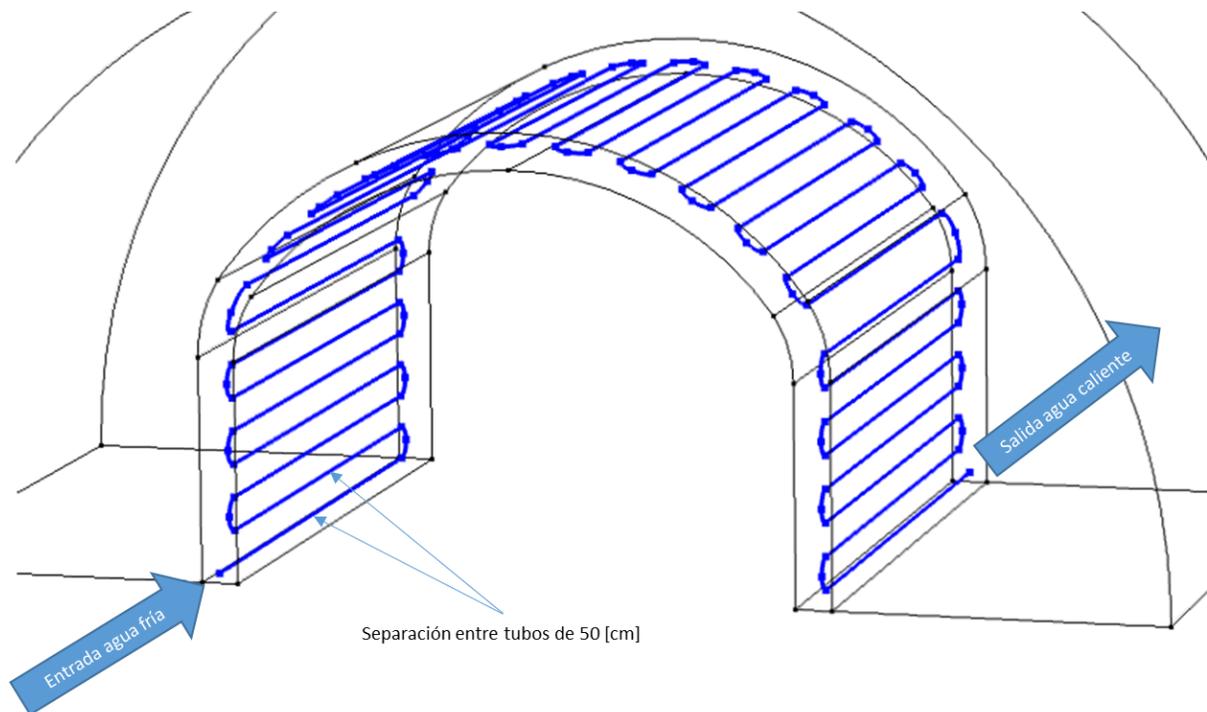


ILUSTRACIÓN 4.18: SERPENTÍN DE TUBOS CON SEPARACIÓN DE 50 CENTÍMETROS

El mallado de la geometría con separación de tubos de 50 centímetros tiene 545.329 elementos tetraédricos con un promedio de calidad de los elementos de 0,7408. El promedio de la tasa de crecimiento de los elementos es 1,724. El mallado resultante se puede ver en la Ilustración 4.19. Comparada con la geometría anterior esta tiene una reducción significativa de la cantidad de elementos, un mejoramiento del promedio de calidad de elementos y una tasa de crecimiento de elementos un poco más suave. Lo anterior se debe a que esta geometría tiene menos metros de tubos embebidos por lo que se reduce la cantidad de elementos refinados que se encuentran alrededor de los tubos.

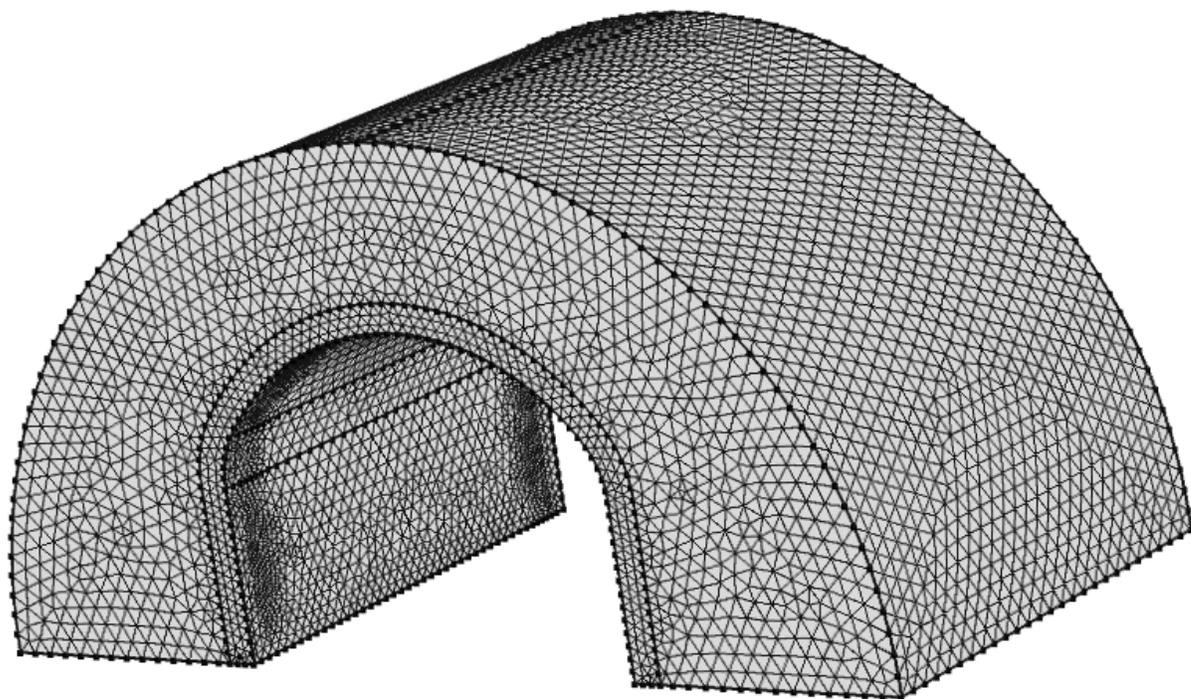


ILUSTRACIÓN 4.19: MALLADO PARA GEOMETRÍA CON SEPARACIÓN DE TUBOS DE 50 CENTÍMETROS

4.3.2.3 GEOMETRÍA CON SEPARACIÓN 70 CENTÍMETROS

Esta geometría es la que tiene menos metros de tubo embebido en la estructura de concreto. Posee un serpentín de 254,8 metros de largo con 28 tubos paralelos y una separación de 70 centímetros entre ellos. La configuración se aprecia en la Ilustración 4.20.

El mallado de la geometría con separación de tubos de 70 centímetros tiene 439.728 elementos tetraédricos con un promedio de calidad de los elementos de 0,7464. El promedio de la tasa de crecimiento de los elementos es 1,705. El mallado resultante se puede ver en la Ilustración 4.21. Comparada con las geometrías anteriores esta tiene la menor cantidad de elementos, el mejor promedio de calidad de elementos y una tasa de crecimiento de elementos más suave que las anteriores. Lo anterior se debe a que esta geometría tiene menos metros de tubos embebidos por lo que se reduce la cantidad de elementos refinados que se encuentran alrededor de los tubos.

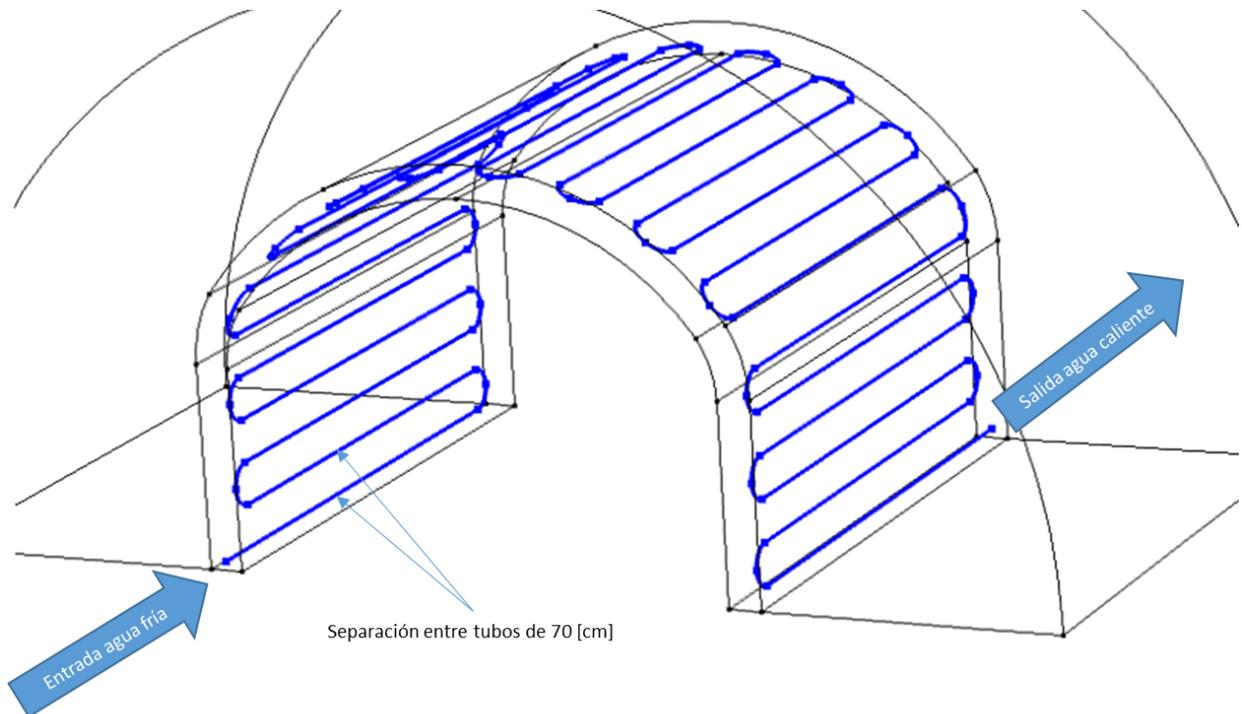


ILUSTRACIÓN 4.20: SERPENTÍN DE TUBOS CON SEPRACIÓN DE 70 CENTÍMETROS

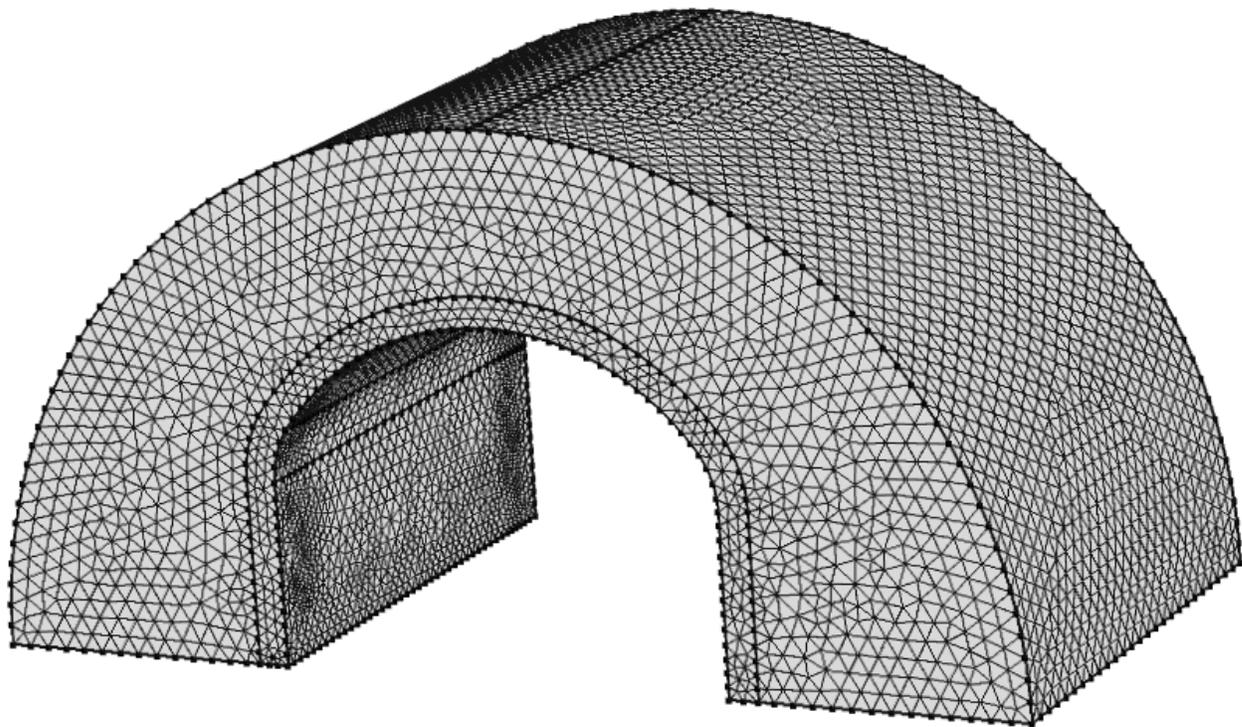


ILUSTRACIÓN 4.21: MALLADO PARA GEOMETRÍAN CON SEPRACIÓN DE TUBOS DE 70 CENTÍMETROS

En la Tabla 4.10 se resumen las características principales de las tres geometrías modeladas.

TABLA 4.10: CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS TRES GEOMETRÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Separación de tubos	30 [cm]	50 [cm]	70 [cm]
Longitud tubo [m]	578,5	345	254,8
Número de tubos paralelos	64	38	28
Cantidad de elementos	847.953	545.329	439.728
Promedio de calidad de elementos	0,7334	0,7408	0,7464
Promedio de tasa de crecimiento de elementos	1,741	1,724	1,705

4.4. RESULTADOS DE MODELACIONES

Los resultados obtenidos se presentan por separado para invierno y verano para poder hacer comparables los distintos diseños a distintos caudales.

Como se menciona en capítulos anteriores la estación de invierno se caracteriza por tener una temperatura del aire al interior del túnel de 20°C. Esta estación es la que aporta menos calor al sistema de serpentines ya que el túnel alcanza su promedio de temperatura del aire mínimo. En cambio en verano la temperatura del aire al interior del túnel es de 30°C por lo que será la época del año en que se aporta mayor calor al sistema.

4.4.1. TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA

La temperatura de salida del agua del serpentín varía dependiendo de la velocidad del flujo y de la estación del año.

- **Invierno**

En la Tabla 4.11 se resumen los valores obtenidos para los quince casos correspondientes a la estación de invierno.

TABLA 4.11: TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AGUA EN INVIERNO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Caudal fluido $\left[\frac{l}{min}\right]$	Temperatura salida agua $[^{\circ}C]$	Variación de temperatura $[^{\circ}C]$
Invierno (aire a 20°C)	30	0,1	1,96	18,16	13,16
		0,2	3,92	18,19	13,19
		0,3	5,88	18,14	13,14
		0,4	7,84	16,85	11,85
		0,5	9,81	15,16	10,16
	50	0,1	1,96	18,48	13,48
		0,2	3,92	18,34	13,34
		0,3	5,88	16,87	11,87
		0,4	7,84	14,45	9,45
		0,5	9,81	13,19	8,19
	70	0,1	1,96	18,62	13,62
		0,2	3,92	17,72	12,72
		0,3	5,88	15,09	10,09
		0,4	7,84	13,47	8,47
		0,5	9,81	13,43	8,43

En el gráfico de la Ilustración 4.22 se observa que para flujos bajos la separación de los tubos no incide significativamente en la temperatura de salida del fluido. Sin embargo, para velocidades mayores o iguales a 0,3 m/s se observa una diferencia importante

para las distintas separaciones de tubos. Para esas velocidades la geometría que alcanza las mayores temperaturas de salida es la con separación de tubos de 30 centímetros.

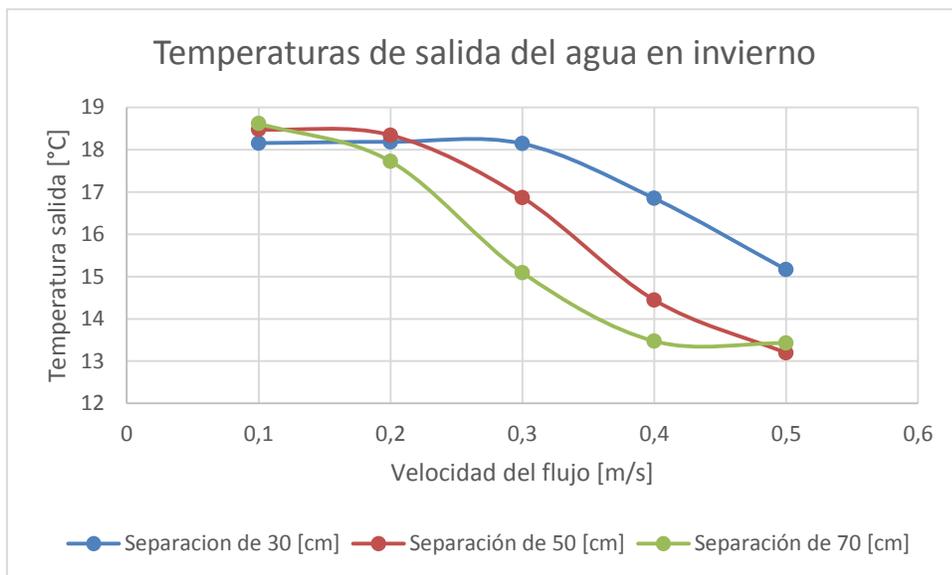


ILUSTRACIÓN 4.22: GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AGUA EN INVIERNO

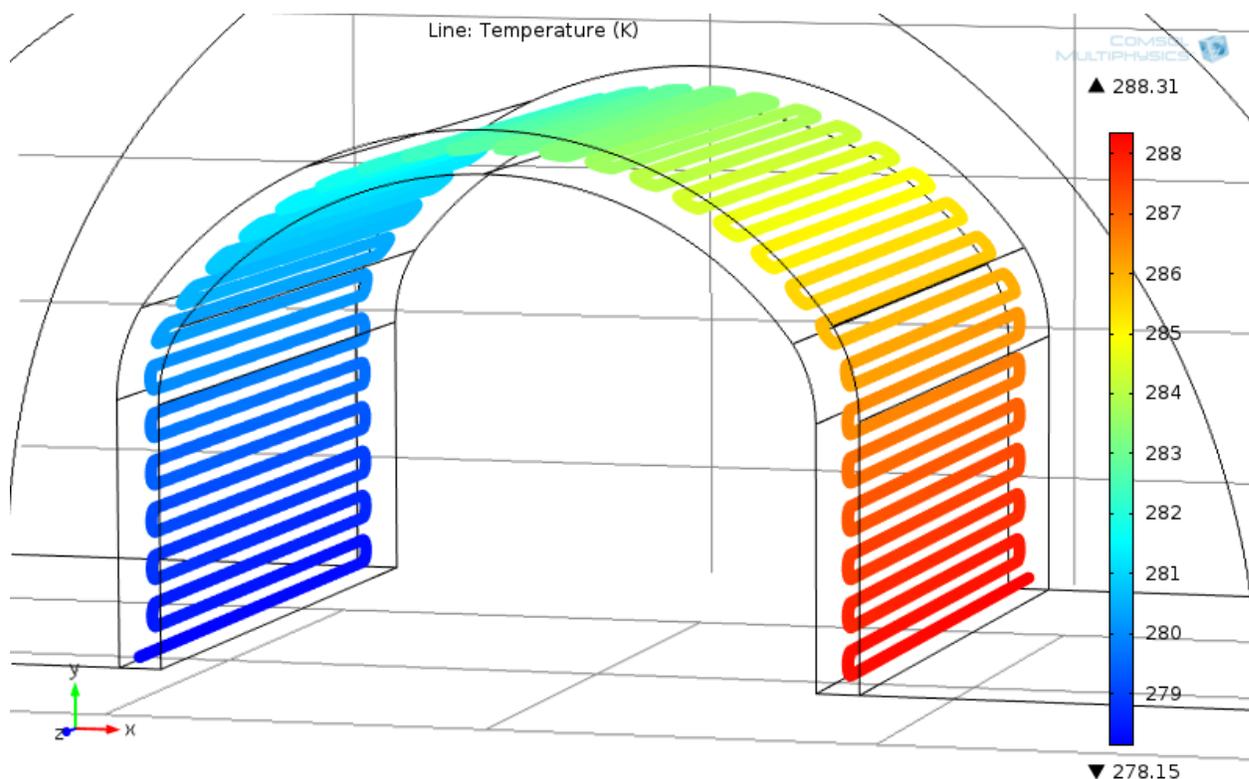


ILUSTRACIÓN 4.23: VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL AGUA A LO LARGO DEL TUBO PARA EL CASO DE SEPARACIÓN DE 30 [CM] A 0,5 [M/S] EN INVIERNO

En la Ilustración 4.23 se puede ver como aumenta la temperatura del agua a lo largo del serpentín entrando agua helada destacada en azul por el lado izquierdo y saliendo agua caliente destacada en rojo por el lado derecho de la imagen.

- **Verano**

En la Tabla 4.12 se resumen los valores obtenidos para los quince casos correspondientes a la estación de verano.

TABLA 4.12: TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AGUA EN VERANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Caudal fluido $\left[\frac{l}{min}\right]$	Temperatura salida agua $[^{\circ}C]$	Variación de temperatura $[^{\circ}C]$
Verano (aire a 30°C)	30	0,1	1,96	23,99	18,99
		0,2	3,92	22,08	17,08
		0,3	5,88	21,78	16,78
		0,4	7,84	21,46	16,46
		0,5	9,81	20,03	15,03
	50	0,1	1,96	25,12	20,12
		0,2	3,92	22,98	17,98
		0,3	5,88	21,84	16,84
		0,4	7,84	19,75	14,75
		0,5	9,81	17,63	12,63
	70	0,1	1,96	25,25	20,25
		0,2	3,92	22,74	17,74
		0,3	5,88	20,66	15,66
		0,4	7,84	18,11	13,11
		0,5	9,81	16,02	11,02

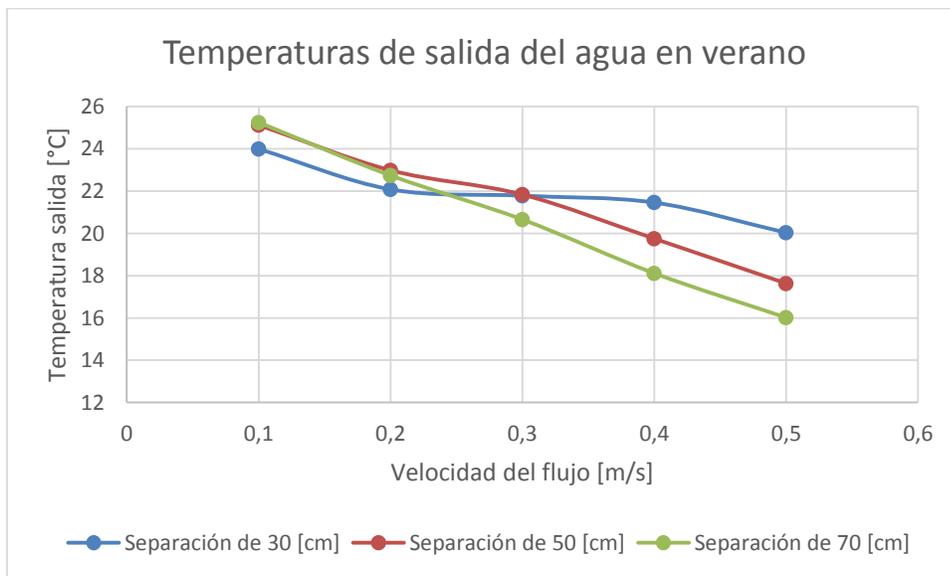


ILUSTRACIÓN 4.24: GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AGUA EN VERANO

En verano para flujos lentos no hay una diferencia significativa en las temperaturas de salida de los serpentines con separación de 50 y 70 centímetros. Para velocidades mayores a 0,3 m/s, si hay una diferencia importante entre las distintas configuraciones de tubos, alcanzando mayores temperaturas la configuración de menor separación como se observa en el gráfico de la Ilustración 4.24. En el mismo gráfico se puede ver que la configuración con separación de 30 centímetros se comporta de manera distinta a las demás, ya que para velocidades de flujo bajas esta configuración alcanza menores temperaturas de salida con respecto a las otras, pero para velocidades altas el comportamiento se invierte alcanzando las mayores temperaturas con respecto a las otras dos configuraciones.

4.4.2. CALOR ABSORBIDO

El calor absorbido por el serpentín proviene del calor presente en aire del túnel y del calor presente en el suelo. Es obvio que el calor aportado por el aire del túnel es mayor en verano que en invierno debido a su mayor temperatura.

- **Invierno**

En la Tabla 4.13 se detallan los valores de calor encontrados para los quince casos correspondientes al invierno.

TABLA 4.13: CALOR ABSORBIDO POR EL AGUA EN INVIERNO

Estación	Separación de tubos [cm]	Largo Serpentin [m]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor absorbido por el agua [W]	Calor absorbido por metro de tubo $\left[\frac{W}{m}\right]$
Invierno (aire a 20°C)	30	578,5	0,1	1.800,77	3,1
			0,2	3.623,70	6,3
			0,3	5.418,84	9,4
			0,4	6.511,03	11,3
			0,5	6.976,09	12,1
	50	345,0	0,1	1.848,86	5,4
			0,2	3.669,11	10,6
			0,3	4.896,24	14,2
			0,4	5.195,16	15,1
			0,5	5.629,31	16,3
	70	254,8	0,1	1.869,52	7,3
			0,2	3.499,51	13,7
			0,3	4.165,43	16,3
			0,4	4.662,21	18,3
			0,5	4.763,41	18,7

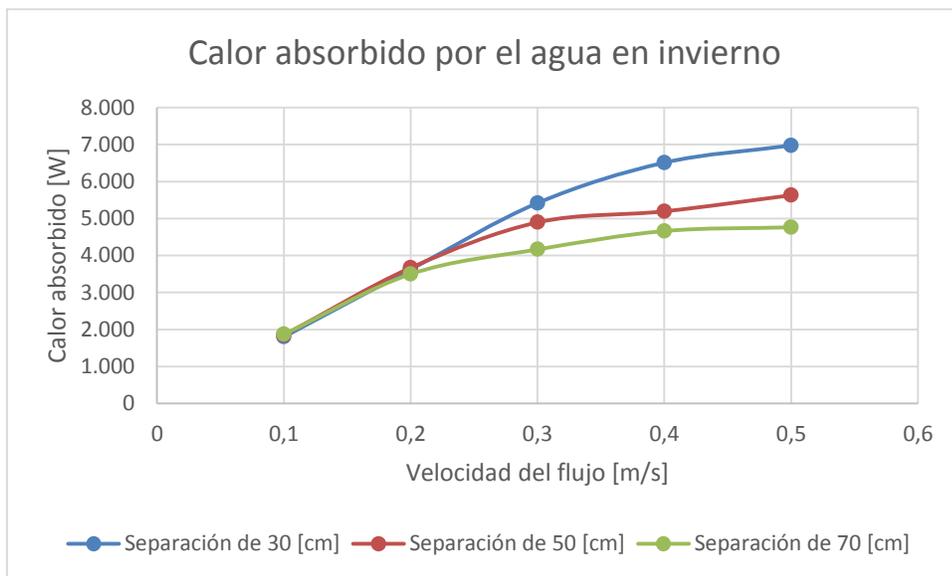


ILUSTRACIÓN 4.25: GRÁFICO DE CALOR ABSORBIDO POR EL AGUA EN INVIERNO

En el gráfico de la Ilustración 4.25 muestra que para velocidades bajas del fluido el calor absorbido por las distintas configuraciones es bastante similar. Sin embargo para velocidades mayores o iguales a 0,3 m/s se observa una diferenciación donde el serpentín con separación de 30 centímetros es el que absorbe más calor y el serpentín con separación de 70 centímetros es que absorbe menos calor.

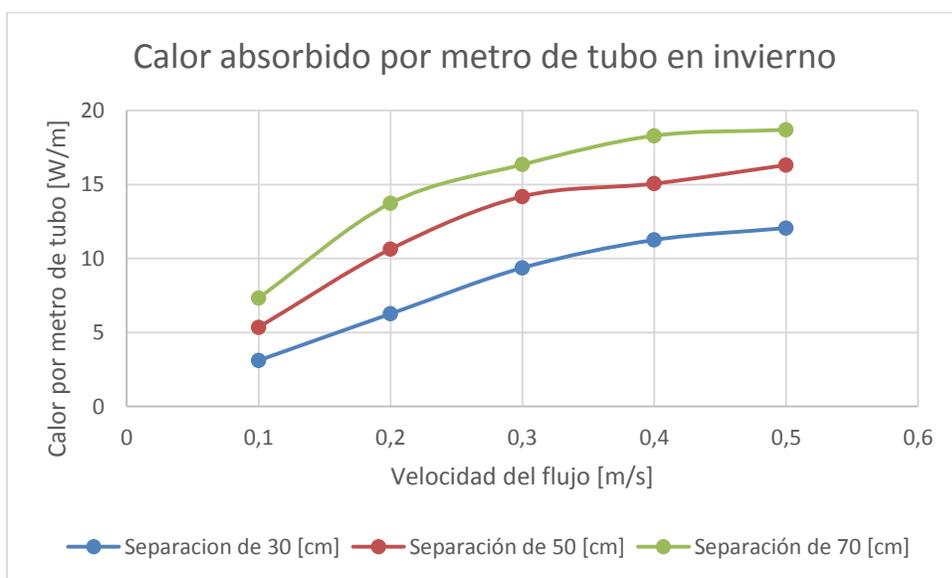


ILUSTRACIÓN 4.26: GRÁFICO DE CALOR ABSORBIDO POR METRO DE TUBO EN INVIERNO

El gráfico de la Ilustración 4.26 muestra que la cantidad de calor absorbido por metro de tubo aumenta a medida que la velocidad del flujo de agua es mayor. La configuración de separación de tubos mayor es la que absorbe más calor por metro de tubo.

- **Verano**

En la Tabla 4.14 se detallan los valores de calor encontrados para los quince casos correspondientes al verano.

TABLA 4.14: CALOR ABSORBIDO POR EL AGUA EN VERANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Largo serpentín [m]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor absorbido por el agua [W]	Calor absorbido por metro de tubo $\left[\frac{W}{m}\right]$
Verano (aire a 30°C)	30	578,5	0,1	2.602,64	4,5
			0,2	4.693,50	8,1
			0,3	6.916,92	12,0
			0,4	9.042,23	15,6
			0,5	10.320,15	17,8
	50	345,0	0,1	2.760,91	8,0
			0,2	4.943,12	14,3
			0,3	6.942,02	20,1
			0,4	8.110,32	23,5
			0,5	8.680,20	25,2
	70	254,8	0,1	2.780,04	10,9
			0,2	4.876,87	19,1
			0,3	6.457,51	25,3
			0,4	7.212,65	28,3
			0,5	7.573,98	29,7

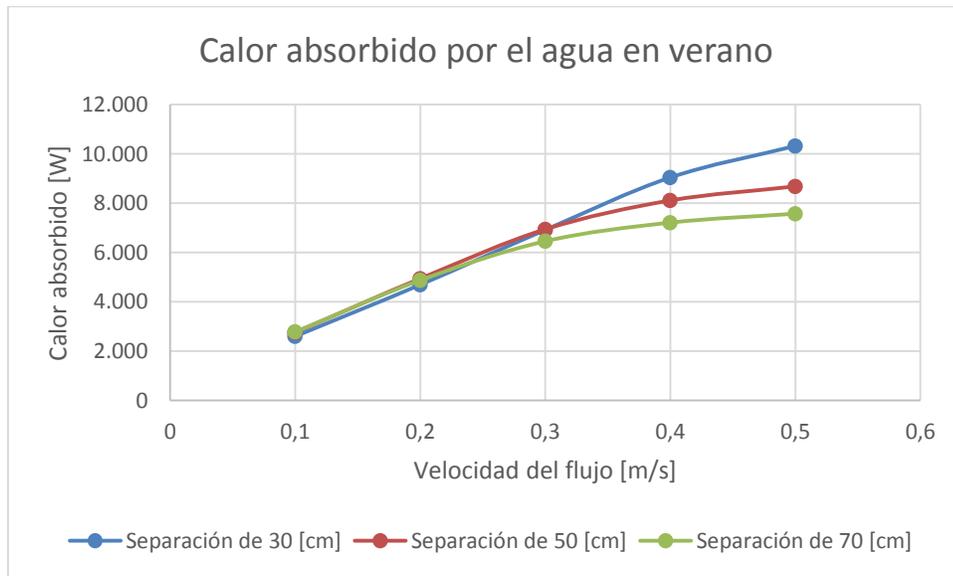


ILUSTRACIÓN 4.27: GRÁFICO DE CALOR ABSORBIDO POR EL AGUA EN VERANO

En el gráfico de la Ilustración 4.27 se observa que en verano el calor absorbido es similar para velocidades de flujo bajas hasta 0,3 m/s. Para velocidades mayores se ve una diferenciación donde el serpentín más largo es el que absorba más calor, y por otro lado el serpentín más corto es que absorbe menos calor.

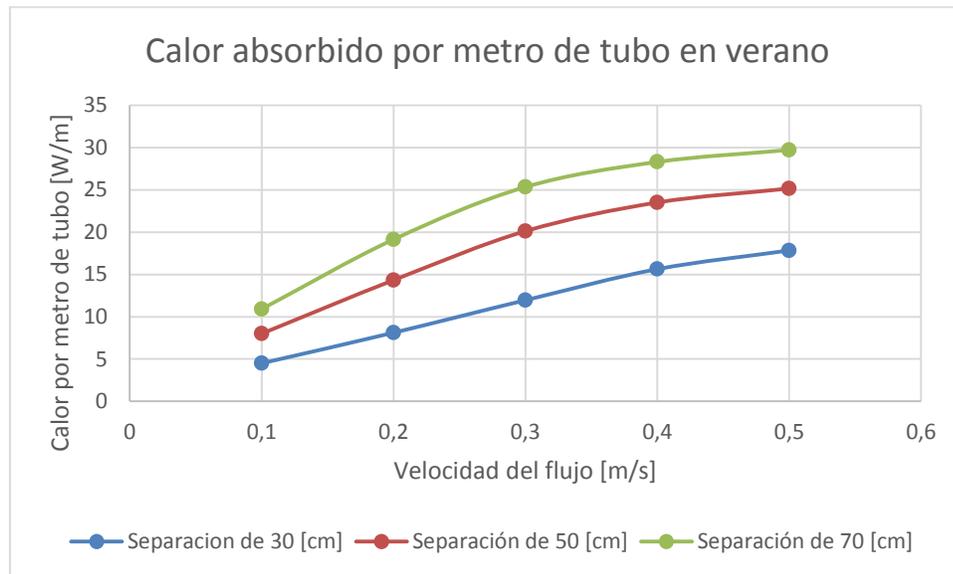


ILUSTRACIÓN 4.28: GRÁFICO DE CALOR ABSORBIDO POR METRO DE TUBO EN VERANO

En el gráfico de la Ilustración 4.28 se observa que el calor absorbido por metro de tubo en verano tiene un comportamiento similar al de invierno de la Ilustración 4.26, solo que en verano los valores son mayores por la mayor energía disponible.

Según la norma VDI 4640 (3) se tiene que para suelo de sedimento seco con conductividad menor a 1,5 [W/mK] la absorción debería estar entre 15 y 25 Watts por metro de tubo, por lo que el modelo estaría dentro de lo esperado.

4.4.3. CALORES APORTADOS POR EL TÚNEL Y EL SUELO

A continuación se presentan las porciones de calor que aporta cada fuente de calor (túnel y suelo) al flujo de agua, para las estaciones de invierno y verano.

- **Invierno**

En la Tabla 4.15 se detalla el calor aportado por el suelo y el túnel en invierno.

TABLA 4.15: APORTES DE CALOR DEL TÚNEL Y DEL SUELO EN INVIERNO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor absorbido por el agua [W]	Calor aportado por el túnel [W]	Aporte túnel	Aporte suelo
Invierno (aire a 20°C)	30	0,1	1.800,77	1.533,94	85%	15%
		0,2	3.623,70	2.188,11	60%	40%
		0,3	5.418,84	3.004,35	55%	45%
		0,4	6.511,03	3.929,12	60%	40%
		0,5	6.976,09	4.485,25	64%	36%
	50	0,1	1.848,86	1.452,66	79%	21%
		0,2	3.669,11	2.333,21	64%	36%
		0,3	4.896,24	3.167,30	65%	35%
		0,4	5.195,16	3.855,92	74%	26%
		0,5	5.629,31	4.147,90	74%	26%
	70	0,1	1.869,52	1.417,97	76%	24%
		0,2	3.499,51	2.400,11	69%	31%
		0,3	4.165,43	3.173,65	76%	24%
		0,4	4.662,21	3.523,13	76%	24%
		0,5	4.763,41	3.839,65	81%	19%

En el gráfico de la Ilustración 4.29 se observa que en invierno la mayor parte del calor absorbido por el agua de los tubos lo aporta el aire caliente del túnel, sobre todo para flujos de 0,1 m/s donde el túnel aporta sobre el 75% del calor para cualquiera de las tres configuraciones de serpentín. Además se aprecia un mínimo en las curvas para la velocidad de 0,3 m/s, por lo tanto para cualquier velocidad de flujo el túnel aporta siempre sobre el 55% del calor.

Luego en el gráfico de la Ilustración 4.30 se observa el comportamiento inverso con un máximo de aporte del suelo de 45% para el caso tubos separados en 30 centímetros y una velocidad del fluido de 0,3 m/s.

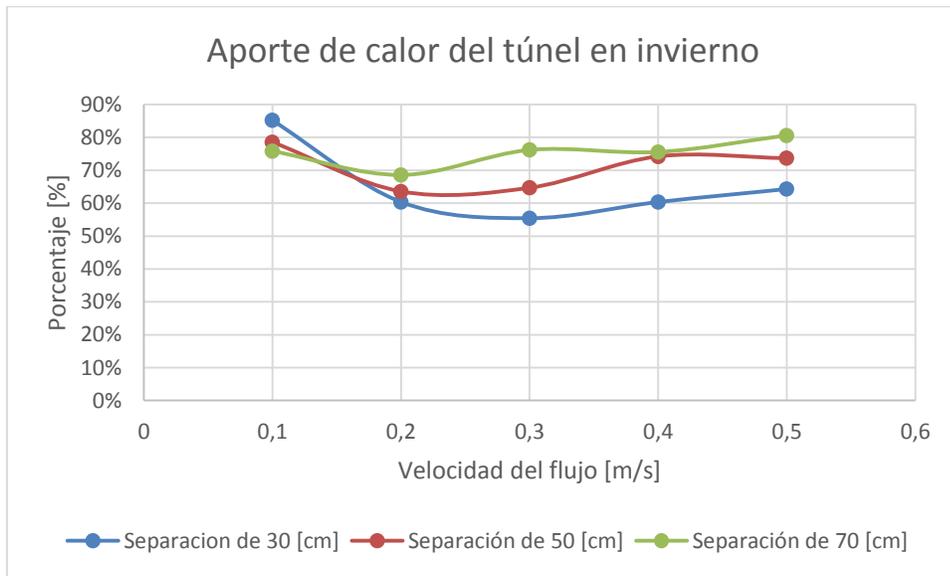


ILUSTRACIÓN 4.29: GRÁFICO DE APORTE DE CALOR DEL TÚNEL EN INVIERNO

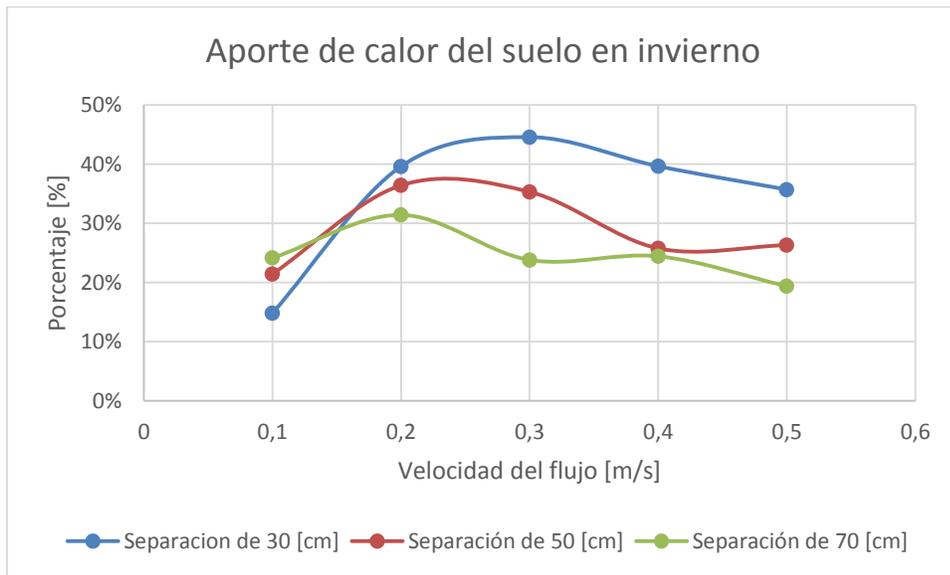


ILUSTRACIÓN 4.30: GRÁFICO DE APORTE DE CALOR DEL SUELO EN INVIERNO

- **Verano**

En la Tabla 4.16 se detalla el calor aportado por el suelo y el túnel en verano.

En el gráfico de la Ilustración 4.31 se observa que el aporte de calor del túnel al fluido es mayor en verano que en invierno y es siempre mayor al 74%. Para velocidades bajas del agua, menores o iguales a 0,2 m/s, ocurre que el aire caliente del túnel aporta el 100% del calor absorbido por el agua que circula por los tubos. Incluso el aire del túnel transfiere calor hacia el suelo.

TABLA 4.16: APORTES DE CALOR DEL TÚNEL Y DEL SUELO EN VERANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor absorbido por el agua [W]	Calor aportado por el túnel [W]	Aporte túnel	Aporte suelo
Verano (aire a 30°C)	30	0,1	2.602,64	4.121,20	158%	-58%
		0,2	4.693,50	5.387,83	115%	-15%
		0,3	6.916,92	6.099,95	88%	12%
		0,4	9.042,23	6.857,43	76%	24%
		0,5	10.320,15	7.639,43	74%	26%
	50	0,1	2.760,91	3.493,43	127%	-27%
		0,2	4.943,12	4.808,93	97%	3%
		0,3	6.942,02	5.642,56	81%	19%
		0,4	8.110,32	6.465,18	80%	20%
		0,5	8.680,20	7.023,43	81%	19%
	70	0,1	2.780,04	3.226,36	116%	-16%
		0,2	4.876,87	4.457,13	91%	9%
		0,3	6.457,51	5.358,13	83%	17%
		0,4	7.212,65	5.984,97	83%	17%
		0,5	7.573,98	6.436,20	85%	15%

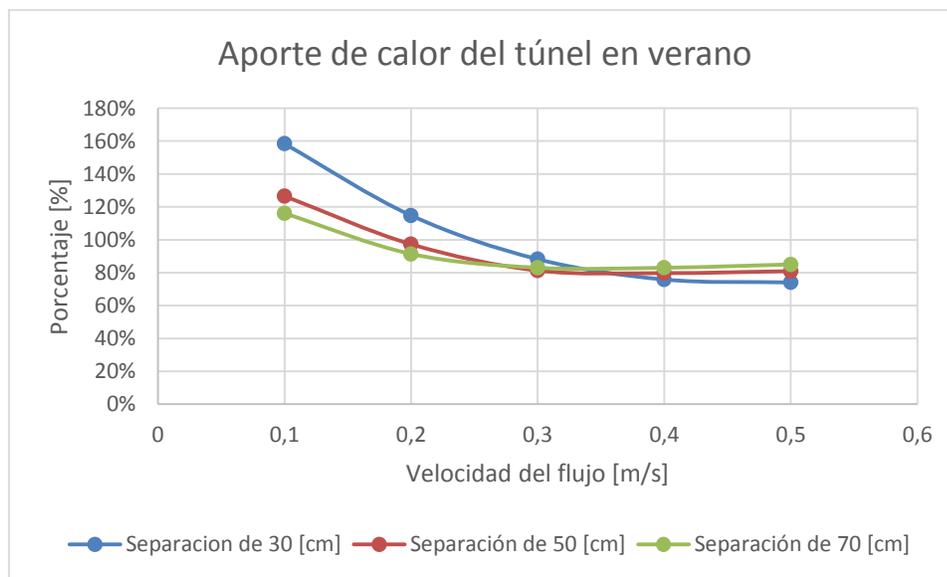


ILUSTRACIÓN 4.31: GRÁFICO DE APORTE DE CALOR DEL TÚNEL EN VERANO

En el gráfico de la Ilustración 4.32 se observa el inverso del gráfico anterior donde el aporte del suelo para velocidades bajas del fluido es negativo. Esto quiere decir que esos casos hay calor que se está perdiendo desde el aire del túnel hacia el suelo. Sobre los 0,3 m/s de velocidad del fluido se aprecia que los aportes de calor del túnel y del suelo son relativamente constantes.

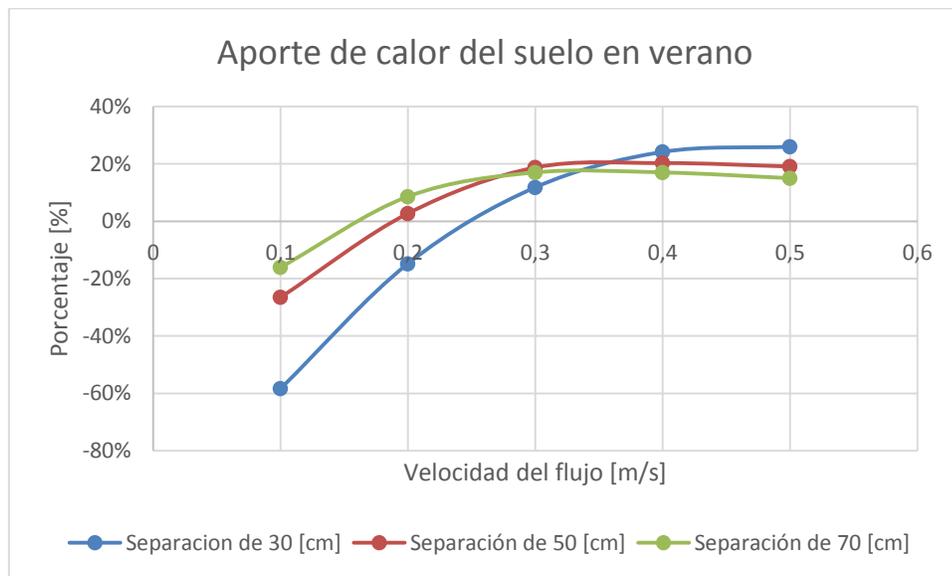


ILUSTRACIÓN 4.32: GRÁFICO DE APOORTE DE CALOR DEL SUELO EN VERANO

4.4.4. PERDIDA DE PRESIÓN EN TUBOS

En la Tabla 4.17 se detallan las pérdidas de presión para invierno y verano.

TABLA 4.17: PERDIDAS DE PRESIÓN PARA INVIERNO Y VERANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Perdida de presión en invierno [Pa]	Perdida de presión en verano [Pa]
30	0,1	4.972	4.593
	0,2	23.722	23.246
	0,3	48.615	47.361
	0,4	80.610	78.476
	0,5	119.195	116.575
50	0,1	3.024	2.810
	0,2	14.236	13.923
	0,3	29.390	28.567
	0,4	48.568	47.417
	0,5	71.578	70.242
70	0,1	2.276	2.104
	0,2	10.568	10.338
	0,3	21.904	21.318
	0,4	36.023	35.289
	0,5	53.111	52.214

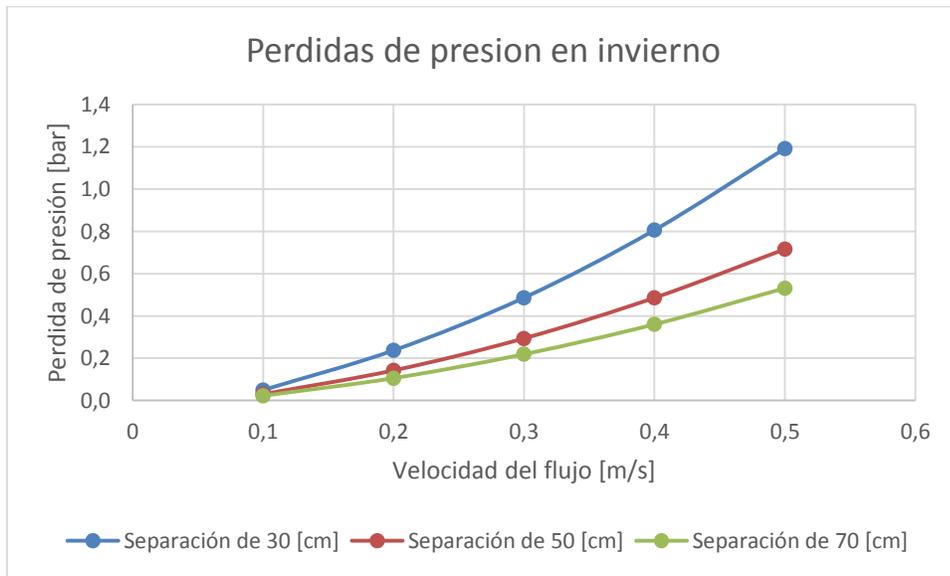


ILUSTRACIÓN 4.33: GRÁFICO DE PERDIDAS DE PRESIÓN EN INVIERNO

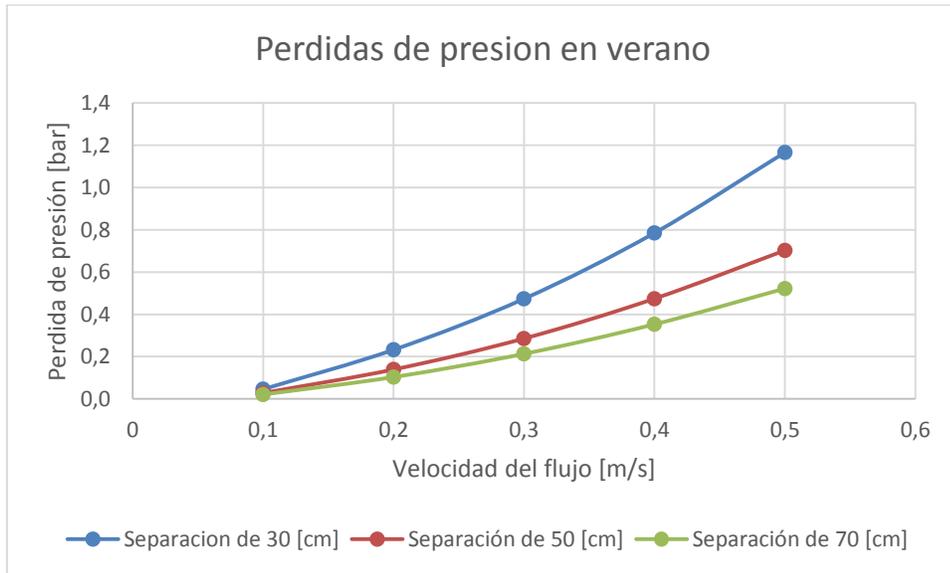


ILUSTRACIÓN 4.34: GRÁFICO DE PERDIDAS DE PRESIÓN EN VERANO

A simple vista los gráficos de la Ilustración 4.33 y la Ilustración 4.34 parecen iguales, pero si se revisan los valores exactos en la Tabla 4.17, en invierno siempre hay un poco más de pérdida de presión lo cual se debe a que el fluido a menor temperatura se vuelve más viscoso.

Además las pérdidas de presión dependen en que régimen se encuentra el flujo al interior del tubo, lo cual depende del número de Reynolds el cual se calcula con la ecuación (4.22).

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (4.22)$$

Donde V es la velocidad promedio del flujo, D es el diámetro de la tubería y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Para Reynolds menores a 2.300 el régimen es laminar, para Reynolds entre 2.300 y 10.000 el régimen es de transición, y para Reynolds mayores a 10.000 el régimen es turbulento. (5)

En la Tabla 4.18 se detallan los números de Reynolds correspondientes a cada flujo y su régimen correspondiente.

TABLA 4.18: RÉGIMEN DEL FLUJO PARA LAS DISTINTAS VELOCIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Velocidad del flujo $\left[\frac{m}{s}\right]$	Número de Reynolds	Régimen
0,1	2.035	Laminar
0,2	4.071	Transición
0,3	6.107	Transición
0,4	8.143	Transición
0,5	10.179	Turbulento

La transición de un régimen laminar a un régimen turbulento explica el comportamiento exponencial de las pérdidas de presión a medida que aumenta la velocidad del flujo, ya que un flujo turbulento tiene mayores pérdidas de presión que uno laminar.

4.4.5. DISTRIBUCIÓN DE CALOR ABSORBIDO EN TUBOS

El calor absorbido a lo largo del tubo claramente no es constante debido a que la temperatura del agua va aumentando a medida que avanza. En los siguientes gráficos se muestran las distribuciones de calor absorbido para las tres configuraciones de distinta separación de tubos, en un régimen de operación en verano con una velocidad de flujo del agua de 0,5 m/s.

En la Ilustración 4.35 se observa la distribución de calor a lo largo del serpentín de separación de 30 centímetros. Es de esperar que el calor absorbido vaya disminuyendo a medida que la temperatura del agua (línea roja) va aumentando. Si bien se observa dicha tendencia, hay puntos como alrededor de los tubos 14 y 50, donde hay una disminución importante de calor absorbido. Esto se debe a que en esos puntos se une la zona del techo con las paredes y se genera una curvatura considerable por lo que disminuye el área de transferencia de calor desde el aire del túnel hacia los tubos.

Además se aprecia que hay un aumento de la absorción de calor en la parte más alta del techo alrededor del tubo 32. Otra característica que se observa es que después del tubo 42 el calor absorbido disminuye a una tasa mayor debido a que después de ese tubo la temperatura del agua sobrepasa los 16°C por lo que el agua deja de absorber calor desde la tierra.

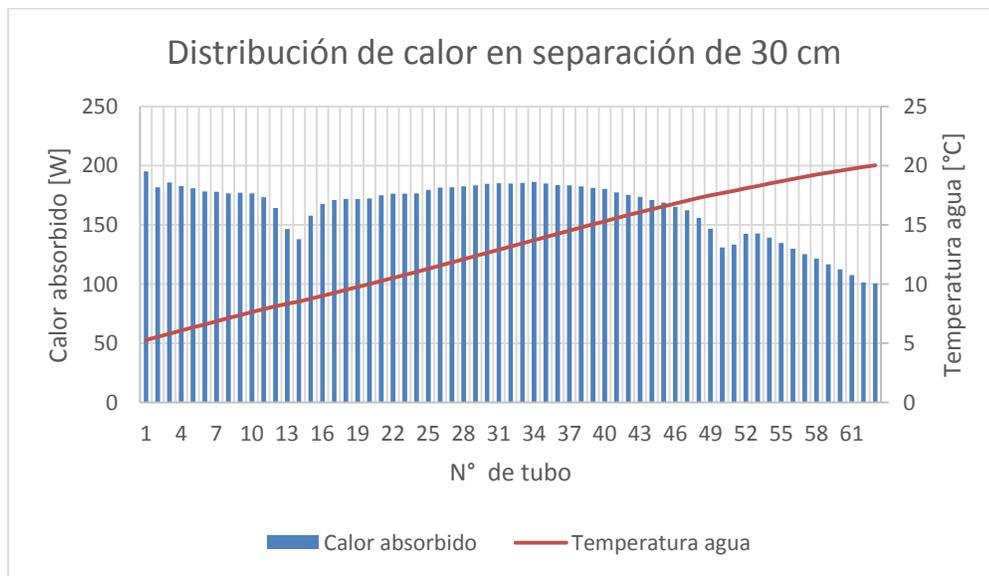


ILUSTRACIÓN 4.35: GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR CON SEPARACIÓN DE 30 CM

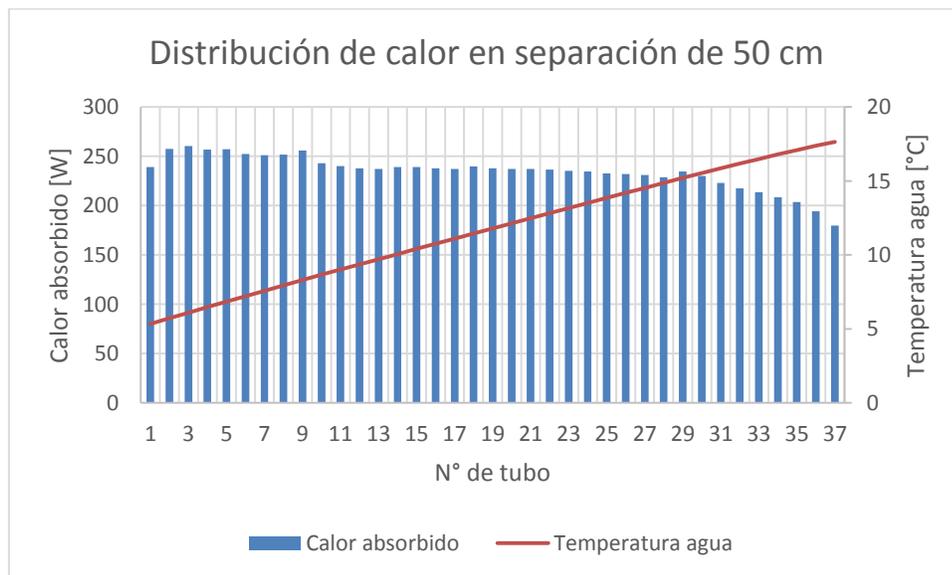


ILUSTRACIÓN 4.36: GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR CON SEPARACIÓN DE 50 CM

En la Ilustración 4.36 se observa la distribución de calor absorbido para la configuración con separación de 50 centímetros. Se observa una disminución constante del calor hasta el tubo 31 donde la tasa de disminución de calor aumenta debido a que el agua supera los 16°C dejando de absorber calor desde el suelo.

En la Ilustración 4.37 se observa el mismo comportamiento del caso anterior con la diferencia de que el agua alcanza los 16°C en el último tubo por lo que se observa una disminución importante solo en ese tubo.

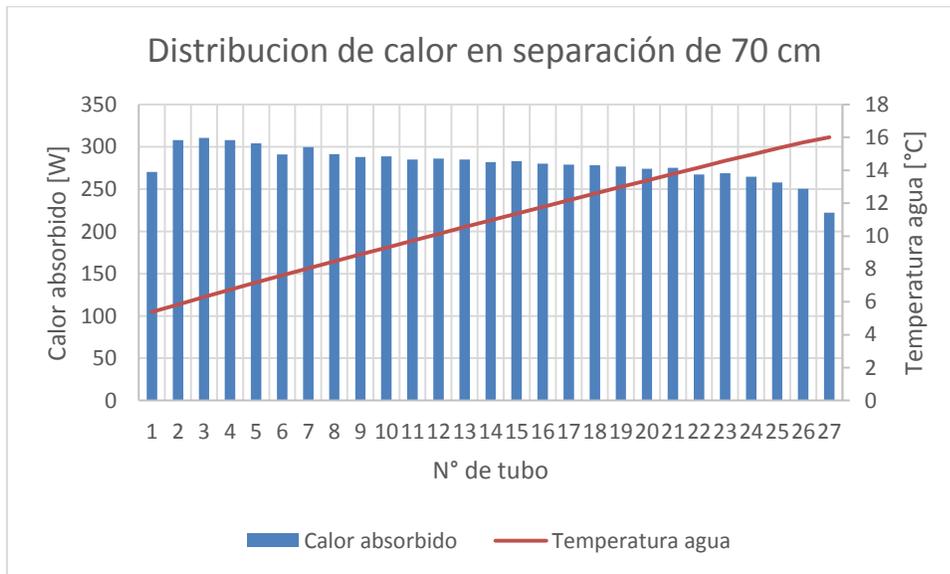


ILUSTRACIÓN 4.37: GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR CON SEPRACIÓN DE 70 CM

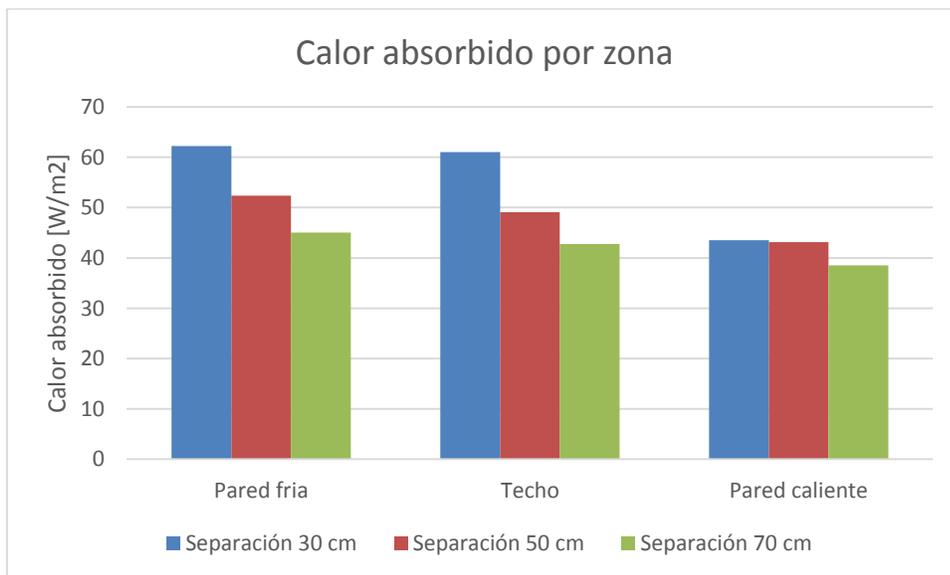


ILUSTRACIÓN 4.38: GRÁFICO DE CALOR ABSORBIDO POR ZONA

En el gráfico de la Ilustración 4.38 se observa el calor absorbido por metro cuadrado en las tres zonas del túnel para las tres configuraciones de tubos distintas. En la configuración de separación de 30 centímetros el calor absorbido es parecido en la pared fría y en el techo con un valor cercano a los 60 W/m^2 . Luego en la pared caliente se observa una disminución importante. En las otras dos configuraciones la disminución de calor es constante.

4.4.6. VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE DEL TÚNEL

Como se ve en el capítulo 4.4.3 el túnel aporta la mayor parte de calor al agua que circula por los tubos, por esto la temperatura del aire al interior del túnel debe disminuir

a medida que avanza por el túnel. Para esto se debe calcular la temperatura de salida tras recorrer los 10 metros por donde está instalado en serpentín dentro del concreto.

La ecuación (4.23) calcula el calor transferido de un fluido con respecto a la variación de temperaturas en la entrada y la salida del flujo.

$$Q = \dot{m} * C_p * (T_{out} - T_{in}) \quad (4.23)$$

Donde Q es el calor transferido, \dot{m} es el flujo másico del aire al interior del túnel, C_p es el calor específico del aire, y T_{out} y T_{in} son las temperaturas de salida y entrada del aire respectivamente.

Al despejar la temperatura de salida se obtiene la ecuación (4.24).

$$T_{out} = \frac{Q}{\dot{m} * C_p} + T_{in} \quad (4.24)$$

Cabe mencionar que en los casos en que la masa de aire pierde calor, el valor de Q es negativo.

A continuación se muestran los valores de las temperaturas calculadas para invierno y verano.

- **Invierno**

En la Tabla 4.19 se muestran los valores de temperaturas de salida del aire en invierno.

TABLA 4.19: TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AIRE DEL TÚNEL EN INVIERNO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos[cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor aportado por el túnel [W]	Temperatura de salida [°C]	Variación de temperatura en 1 Km de túnel [°C]
Invierno (aire a 20°C)	30	0,1	1.533,94	19,9831	-1,69
		0,2	2.188,11	19,9759	-2,41
		0,3	3.004,35	19,9670	-3,30
		0,4	3.929,12	19,9568	-4,32
		0,5	4.485,25	19,9507	-4,93
	50	0,1	1.452,66	19,9840	-1,60
		0,2	2.333,21	19,9743	-2,57
		0,3	3.167,30	19,9652	-3,48
		0,4	3.855,92	19,9576	-4,24
		0,5	4.147,90	19,9544	-4,56
	70	0,1	1.417,97	19,9844	-1,56
		0,2	2.400,11	19,9736	-2,64
		0,3	3.173,65	19,9651	-3,49
		0,4	3.523,13	19,9613	-3,87
		0,5	3.839,65	19,9578	-4,22

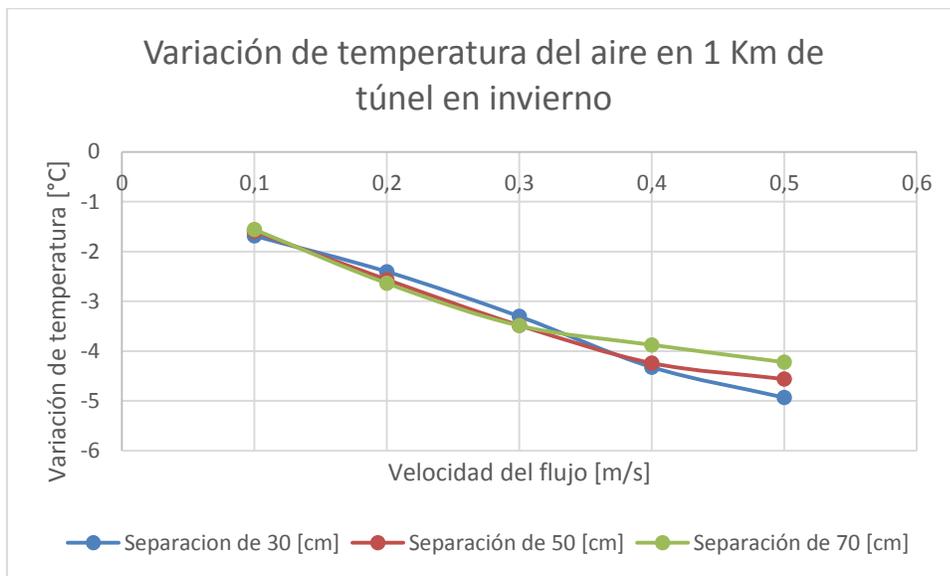


ILUSTRACIÓN 4.39: GRÁFICO DE VARIACION DE TEMPERATURA DEL AIRE EN 1 KM DE TÚNEL EN INVIERNO

En el gráfico de la Ilustración 4.39 se observa que las tres configuraciones se comportan de manera similar y que la temperatura de salida del aire al interior del túnel disminuye al aumentar la velocidad del flujo de agua de los tubos. En invierno se puede llegar a reducir en 5 °C la temperatura del aire al interior del túnel utilizando la configuración de separación de 30 centímetros con una velocidad del flujo de agua de 0,5 m/s. Con una velocidad del flujo de agua de 0,1 m/s solo se logra reducir la temperatura en 1,5°C en un kilómetro de túnel.

- **Verano**

En la Tabla 4.20 se muestran los valores de temperaturas de salida del aire en verano.

TABLA 4.20: TEMPERATURAS DE SALIDA DEL AIRE DEL TÚNEL EN VERANO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$	Calor aportado por el túnel [W]	Temperatura de salida [$^{\circ}C$]	Variación de temperatura en 1 Km de túnel [$^{\circ}C$]
Verano (aire a 30°C)	30	0,1	1.533,94	29,9547	-4,53
		0,2	2.188,11	29,9407	-5,93
		0,3	3.004,35	29,9329	-6,71
		0,4	3.929,12	29,9246	-7,54
		0,5	4.485,25	29,9160	-8,40
	50	0,1	1.452,66	29,9616	-3,84
		0,2	2.333,21	29,9471	-5,29
		0,3	3.167,30	29,9379	-6,21
		0,4	3.855,92	29,9289	-7,11
		0,5	4.147,90	29,9228	-7,72
	70	0,1	1.417,97	29,9645	-3,55
		0,2	2.400,11	29,9510	-4,90
		0,3	3.173,65	29,9411	-5,89
		0,4	3.523,13	29,9342	-6,58
		0,5	3.839,65	29,9292	-7,08

En el caso del verano la variación de temperatura del aire del túnel es mayor como se puede ver en el gráfico de la Ilustración 4.40. Se observa claramente que para las configuraciones de menor separación de tubos, la variación de temperatura del aire es mayor. Para la velocidad de flujo de agua más baja la temperatura del aire se reduce alrededor de 4°C y para la velocidad mayor la temperatura del aire se reduce alrededor de 8°C.

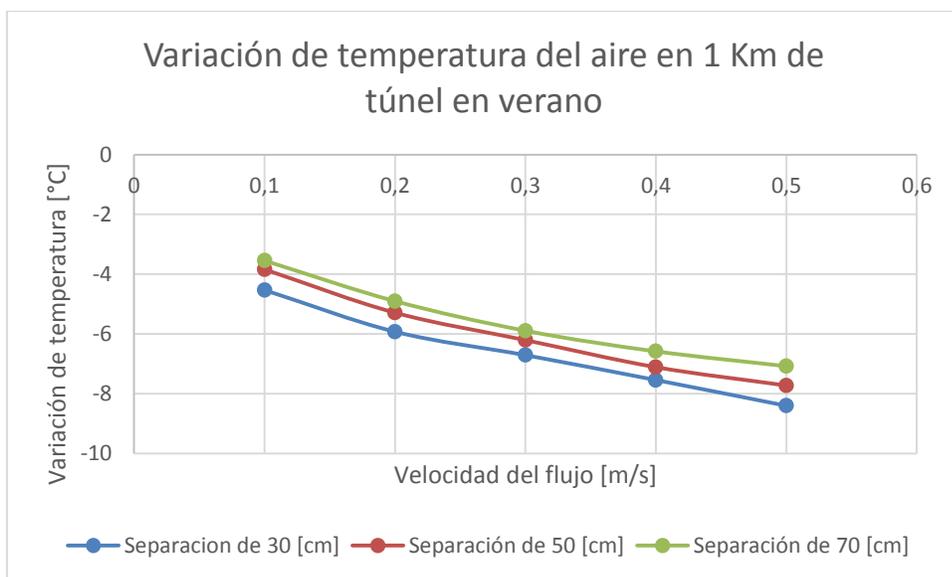


ILUSTRACIÓN 4.40: GRÁFICO DE VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL AIRE EN 1 KM DE TÚNEL EN VERANO

4.4.7. SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE CONDUCTIVO DEL CONCRETO

TABLA 4.21: CALOR ABSORBIDO PARA DISTINTOS COEFICIENTES CONDUCTIVOS DEL CONCRETO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Coeficiente conductivo concreto $\left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$	Temperatura de salida del agua [$^{\circ}K$]	Calor absorbido por tubo [W]
0,9	287,83	3.993
1,0	288,50	4.270
1,1	288,67	4.341
1,2	288,83	4.405
1,3	289,37	4.628
1,4	289,48	4.674
1,5	289,58	4.717
1,6	290,02	4.896
1,7	290,09	4.927
1,8	290,16	4.956
1,9	290,23	4.983
2,0	290,29	5.008

Según la Norma VDI 4640 (3) el coeficiente conductivo del concreto recomendado es de $1,6 \left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$ pero indica que el rango de coeficientes conductivos para el concreto está entre 0,9 y $2,0 \left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$. Por lo anterior se hace el análisis de comportamiento del sistema de tubos embebido ante la variación del coeficiente conductivo del concreto dentro del rango indicado verificando el calor que absorbido por los tubos en cada caso. Para esto se elige la configuración con separación de tubos de 50 centímetros con una velocidad del flujo de agua de 0,3 m/s en la estación de invierno (aire a 20°C) y se hacen 12 modelaciones para 12 coeficientes conductivo. En la Tabla 4.21 se detallan los valores de calor absorbidos por los tubos para cada coeficiente.

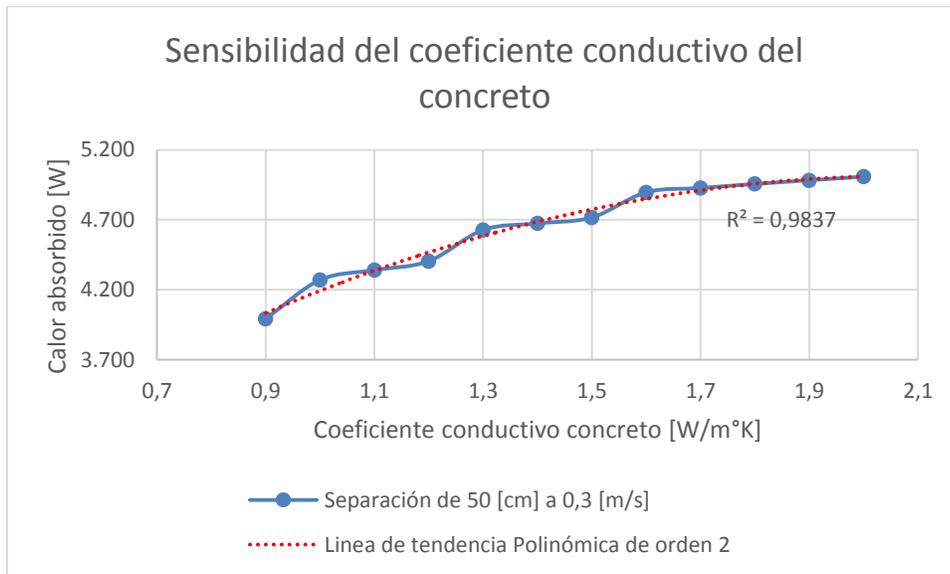


ILUSTRACIÓN 4.41: GRÁFICO DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE CONDUCTIVO DEL CONCRETO (R^2 =COEF. DE DETERMINACIÓN)

En el gráfico de la Ilustración 4.41 se observa el comportamiento del calor absorbido por el agua del interior de los tubos con respecto a distintos coeficientes conductivos de concreto. Por la línea de tendencia destacada en el gráfico por punto rojos, se puede ver que la dependencia es casi lineal decreciendo para valores de conductividad mayores a $1,5 \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$.

Cabe mencionar que no deja de ser significativo el tipo de concreto que se utilice, ya que para concretos de conductividad baja se pueden desperdiciar alrededor de 2000 [W] de potencia comparado con el concreto de mejor conductividad.

5. DISCUSIONES

5.1. VALIDACIÓN DE CALOR

En el capítulo anterior se presentan diversos valores característicos del sistema, donde uno de los más relevantes es la cantidad de calor que es absorbido por los tubos embebidos en la estructura de concreto. Dicha cantidad de calor es entregada por Comsol por que una manera de verificar si ese valor tiene concordancia con la variación de temperaturas del agua entre la entrada y la salida del tubo es hacer el cálculo con la ecuación (4.23) vista en el capítulo anterior 4.4.5. Los valores estimados se resumen y se comparan con los valores entregados por el software en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Comparación de calor estimado y calor entregado por Comsol

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad flujo de agua [m/s]	Calor Comsol [W]	Calor estimado [W]
Invierno (aire a 20°C)	30	0,1	1.800,77	1.795,03
		0,2	3.623,70	3.598,21
		0,3	5.418,84	5.379,68
		0,4	6.511,03	6.466,36
		0,5	6.976,09	6.934,07
	50	0,1	1.848,86	1.839,15
		0,2	3.669,11	3.641,13
		0,3	4.896,24	4.857,96
		0,4	5.195,16	5.154,99
		0,5	5.629,31	5.589,28
	70	0,1	1.869,52	1.858,12
		0,2	3.499,51	3.471,82
		0,3	4.165,43	4.130,91
		0,4	4.662,21	4.624,46
		0,5	4.763,41	4.727,12
Verano (aire a 30°C)	30	0,1	2.602,64	2.591,24
		0,2	4.693,50	4.661,10
		0,3	6.916,92	6.868,41
		0,4	9.042,23	8.981,29
		0,5	10.320,15	10.255,42
	50	0,1	2.760,91	2.745,43
		0,2	4.943,12	4.907,09
		0,3	6.942,02	6.890,61
		0,4	8.110,32	8.050,34
		0,5	8.680,20	8.617,90
	70	0,1	2.780,04	2.762,57
		0,2	4.876,87	4.840,63
		0,3	6.457,51	6.407,87
		0,4	7.212,65	7.156,61
		0,5	7.573,98	7.516,14

Al ver los valores comparados en la tabla anterior se observa una leve diferencia de los valores pero se debe a que la estimación se hace con valores de densidad y calor específico constantes lo cual no es completamente correcto ya que dichos valores varían con la temperatura del agua. Sin embargo el error no es tan significativo y los valores estimados muestran la misma tendencia que los entregados por Comsol solo con un leve desfase.

5.2. COMPARACIÓN CON DEMANDA TÉRMICA DE BEAUCHEF 851

Para mostrar de manera más tangible la capacidad de absorción de calor del sistema de tubos embebidos en la estructura de concreto se hace una comparación con el calor demandado por un edificio real. En la Tabla 5.2 se muestra la demanda térmica del nuevo edificio de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile ubicado en Beauchef 851. La demanda térmica se obtiene de la Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Cristóbal Andrés Bravo Arata (9), pero los datos provienen realmente de la modelación energética realizada por el IDIEM como parte del proyecto de climatización del nuevo edificio. La demanda también incluye la demanda térmica para refrigeración pero para el presente informe no es útil dicha información ya que el sistema estudiado solo sirve para calefaccionar.

TABLA 5.2: DEMANDA TÉRMICA BEAUCHEF 851. FUENTE: (9)

Mes	Demanda de calefacción	
	[kWh]	% respecto al total
Enero	228	0,04%
Febrero	-	0,00%
Marzo	3.872	0,66%
Abril	20.387	3,49%
Mayo	76.071	13,02%
Junio	106.838	18,29%
Julio	174.608	29,89%
Agosto	115.039	19,70%
Septiembre	55.667	9,53%
Octubre	26.236	4,49%
Noviembre	4.662	0,80%
Diciembre	481	0,08%
Anual	584.088	100,00%

En la Tabla 5.3 se puede ver el aporte que hacen 100 metros de túnel con el sistema de tubos instalado en el mes de Julio donde la demanda mensual para calefacción es de 174.608 kWh. Con la configuración de tubos separados por 30 centímetros a velocidades de flujo mayores a 0,3 m/s se puede cubrir más del 25% de la energía requerida en el mes de mayor demanda. Es decir que con 400 metros de túnel con el sistema de tubos embebidos se podría cubrir el 100% de la demanda.

TABLA 5.3: APORTE DE 100 METROS DE TÚNEL A LA DEMANDA TÉRMICA DE BEAUCHEF 851 EN EL MES DE JULIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Separación de tubos [cm]	Velocidad flujo de agua [m/s]	Energía utilizable en 100 m de túnel por mes [kWh]	Aporte de 100 m de túnel en Julio
Invierno (aire a 20°C)	30	0,1	12.966	7,43%
		0,2	26.091	14,94%
		0,3	39.016	22,34%
		0,4	46.879	26,85%
		0,5	50.228	28,77%
	50	0,1	13.312	7,62%
		0,2	26.418	15,13%
		0,3	35.253	20,19%
		0,4	37.405	21,42%
		0,5	40.531	23,21%
	70	0,1	13.461	7,71%
		0,2	25.196	14,43%
		0,3	29.991	17,18%
		0,4	33.568	19,22%
		0,5	34.297	19,64%

En el mes de enero la demanda para calefacción del edificio es de 228 kWh la cual se cubre en su 100% con solo 10 metros de túnel con el sistema de tubos instalado, ya que en la peor de las configuraciones la energía utilizable es de 1.874 kWh.

5.3. FLUJO DE CALOR EN EL SUELO

El flujo de calor en suelo no solo es en dirección normal a la superficie externa del concreto, sino que también hay un flujo transversal a través de él como se puede ver en la Ilustración 5.3 donde se destacan los bordes isotérmicos del suelo y el concreto.

Las Ilustraciones 5.1, 5.2 y 5.3 corresponden al caso del serpentín con separación de 30 centímetros con velocidad de flujo de 0,5 m/s en invierno.

En la Ilustración 5.1 se observa la distribución de temperatura en el suelo y el concreto en la Ilustración 5.2 se tiene una vista en corte de lo mismo. Se observa que las temperaturas más bajas del suelo se encuentran alrededor de la entrada de agua helada en el lado izquierdo de la imagen y las temperaturas más altas se tienen el lado opuesto alrededor de la salida de agua caliente. Al observar la vista en corte se pueden ver los tubos que están a través del concreto, los cuales forman un tipo de barrera de calor en lado izquierdo de la imagen debido a que en los primeros metros el agua helada absorbe calor desde el aire del túnel y desde la tierra. En cambio, en el lado derecho no se aprecia esa barrera marcada porque en ese lado el agua está más caliente que la tierra por lo que hay una transferencia de calor desde el túnel y los tubos hacia la tierra.

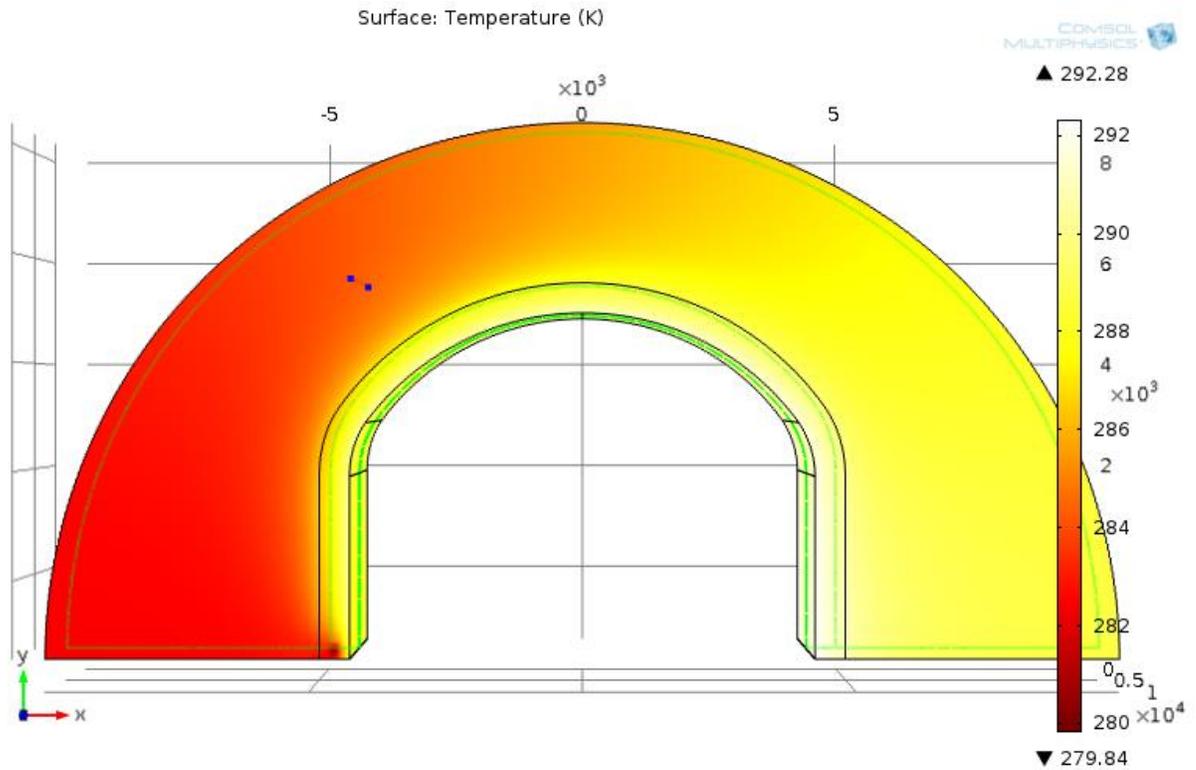


ILUSTRACIÓN 5.1: VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL SUELO Y EL CONCRETO

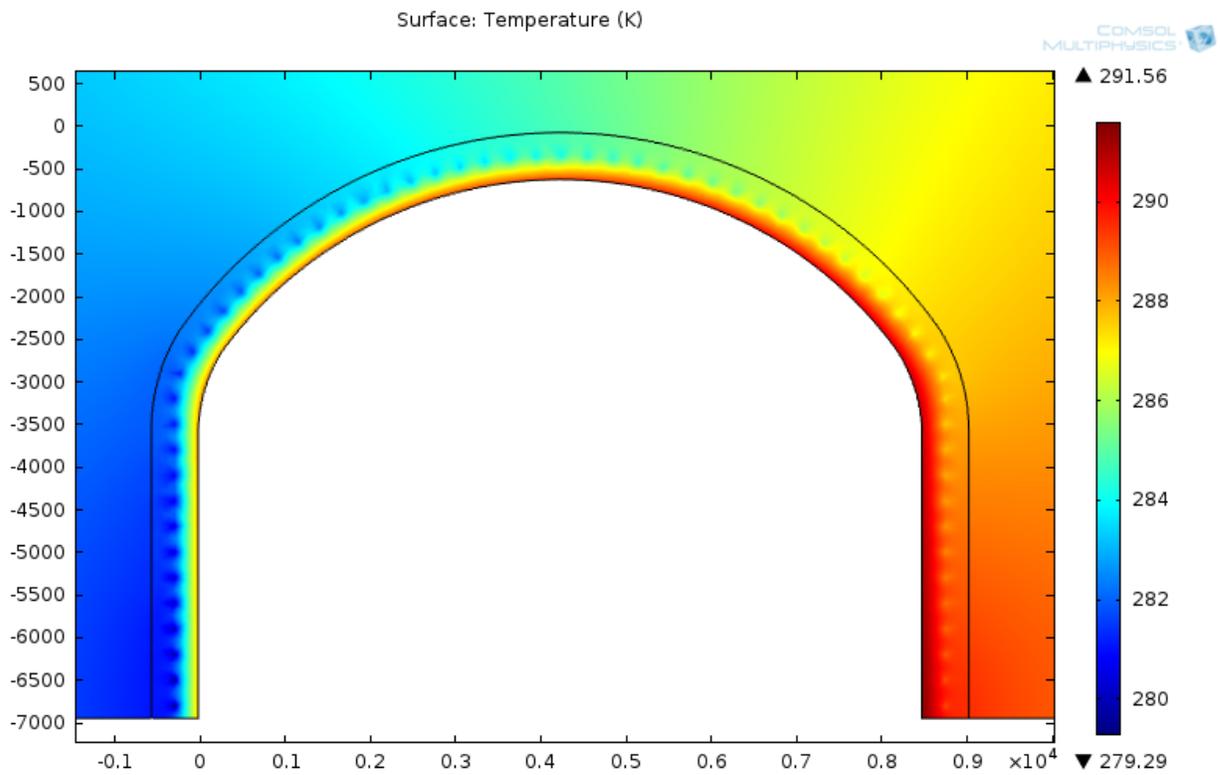


ILUSTRACIÓN 5.2: VISTA EN CORTE DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL SUELO Y CONCRETO

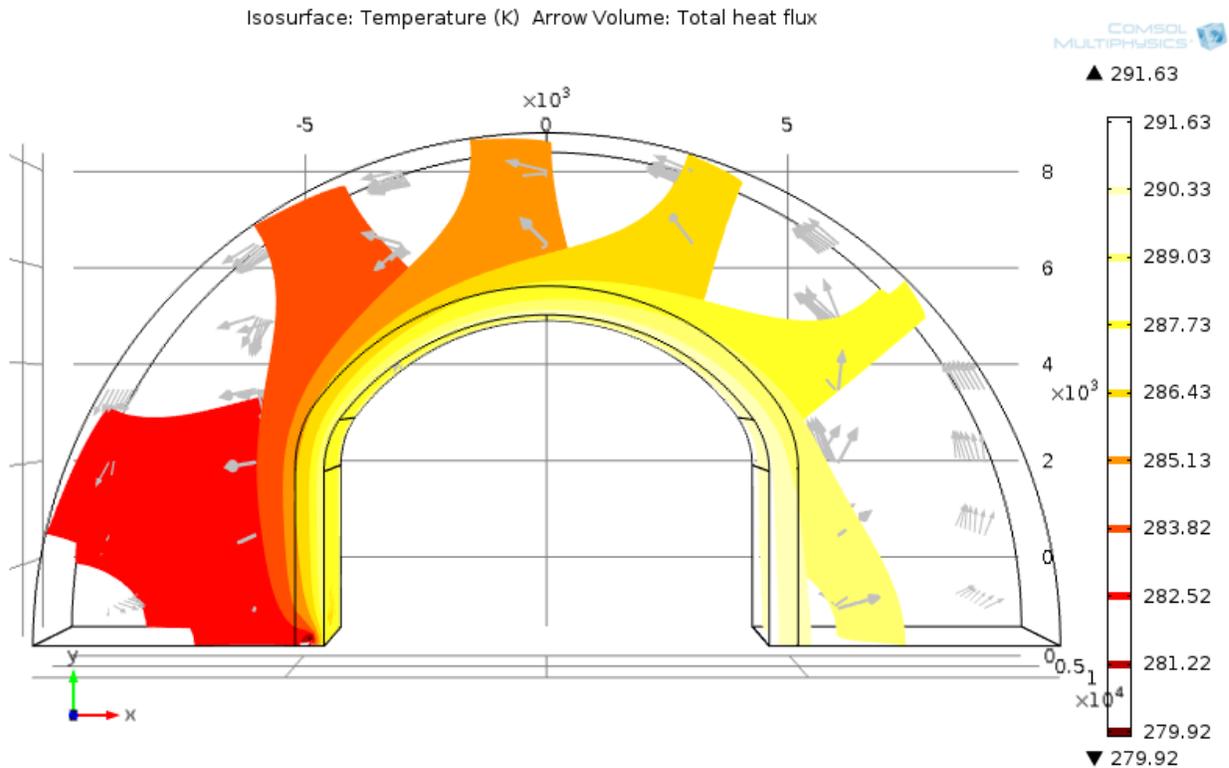


ILUSTRACIÓN 5.3: CONTORNOS ISOTÉRMICOS EN EL SUELO Y EL CONCRETO

Una hipótesis que no se estudia en la presente memoria, pero que se puede presumir con conocimientos de transferencia de calor es que dado que se genera un gradiente térmico en el suelo de derecha a izquierda puede haber un orden de instalación de los serpentines mejor que otro. El orden de instalación se refiere hacia qué lado instalar la entrada de agua fría y la salida de agua caliente.

El orden que se presume mejor es que alternadamente un serpentín tenga la entrada de agua caliente a un lado y el siguiente serpentín tenga la entrada por el lado opuesto. Esto provoca que el primer serpentín tenga una zona de suelo caliente y el segundo serpentín tenga una zona de suelo frío contigua a la zona caliente del primer serpentín generando un flujo de calor desde la primera zona hacia la segunda zona. Lo anterior es parecido al principio del sistema de contraflujo en intercambiadores de calor.

5.4. SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN ADECUADA

Como se sabe, se han estudiado tres configuraciones distintas de serpentines con distintas separaciones de tubos cada una. Con el fin de elegir cual configuración es la más adecuada se revisan distintos aspectos de los distintos casos.

Basados en la Norma VDI 4640 (3), se recomienda un rango de temperaturas para el fluido de los tubos con respecto a la temperatura del suelo donde estén instalados los tubos. Recomienda una variación de $\pm 11^{\circ}\text{C}$ por lo que en este caso para un suelo a 16°C el fluido puede variar su temperatura entre 5 y 27°C .

En este aspecto, revisando las temperaturas en la Tabla 4.11 y la Tabla 4.12, todas las configuraciones cumplen la recomendación ya que en todos los casos la menor temperatura del agua es de 5°C en la entrada del serpentín y la mayor temperatura alcanzada es de 25,25°C correspondiente a la configuración con separación de tubos de 70 centímetros con una velocidad del flujo de agua de 0,1 m/s en verano.

Con respecto a la Norma IGSHPA (2009) (8) que establece un rango de temperaturas para el fluido que ingresa a una bomba de calor estándar entre -4 y 35°C, todas las configuraciones la cumplen ya que el agua varía entre 5 y 25,25°C.

Con respecto a la cantidad de calor absorbido para velocidades de flujo bajas no hay una diferencia significativa, pero para velocidades sobre los 0,3 m/s la configuración que absorbe más calor es la con separación de 30 centímetros debido a que es la con más metros de tubo, por lo tanto la con mayor superficie de intercambio de calor.

Otro beneficio del sistema de tubos embebido en el concreto del túnel, aparte de la obtención de calor para uso distrital, es la disminución de temperatura del aire del túnel al transferir calor del aire al agua de los tubos. Esto es un beneficio ya que el Metro de Santiago es utilizado presta servicio a personas las cuales no se sienten cómodas a temperaturas muy altas del aire. Sobre todo en verano en que hay momentos del día en que el aire del túnel tiene temperaturas cercanas a los 40°C. En este sentido el serpentín con separación de tubos de 30 centímetros es el más adecuado para reducir la temperatura del aire al interior de túnel.

Si bien la configuración con más metros de tubo es mejor en los aspectos revisados anteriormente, tiene un aspecto en contra que es la cantidad de calor absorbida por metro de tubo. En ese sentido es la configuración que menos calor absorbe por metro de tubo lo cual incide en los costos del sistema ya que se deberán utilizar más metros de tubo y el tiempo de instalación será mayor.

La caída de presión es otro aspecto que no favorece a tener más metros de tubo instalados ya que se perderá más presión, por lo que se necesita una bomba más potente que haga circular el fluido. No vale la pena ahorrar energía en calefacción utilizando este sistema de tubos embebido, si es que la energía ahorrada se utilizara en levantar grandes presiones para hacer circular el agua.

Otro punto que es una desventaja de la configuración con mayor largo de tubos es que en verano para flujo bajos favorece la transferencia de calor hacia la tierra debido a que el agua alcanza su temperatura máxima en los primeros metros del serpentín pero luego el agua ya no sigue aumentando su temperatura porque comienza a entregar calor hacia la tierra. Por eso es que para las configuraciones de mayor separación de tubos, es menor la cantidad de calor transferida a la tierra.

En la Ilustración 5.4 se puede ver este fenómeno anterior con el caso del verano con la configuración de separación de tubos de 30 centímetros con una velocidad de flujo de 0,1 m/s. Por el lado derecho ingresa el agua helada a 5°C destacado en color azul y luego a menos de la mitad del recorrido de tubos el agua alcanza su temperatura máxima destacada en color rojo. En los metros de tubo restantes, los del lado izquierdo

de la foto, se produce una transferencia de calor desde los tubos hacia la tierra que a esta a una temperatura menos de 16°C.

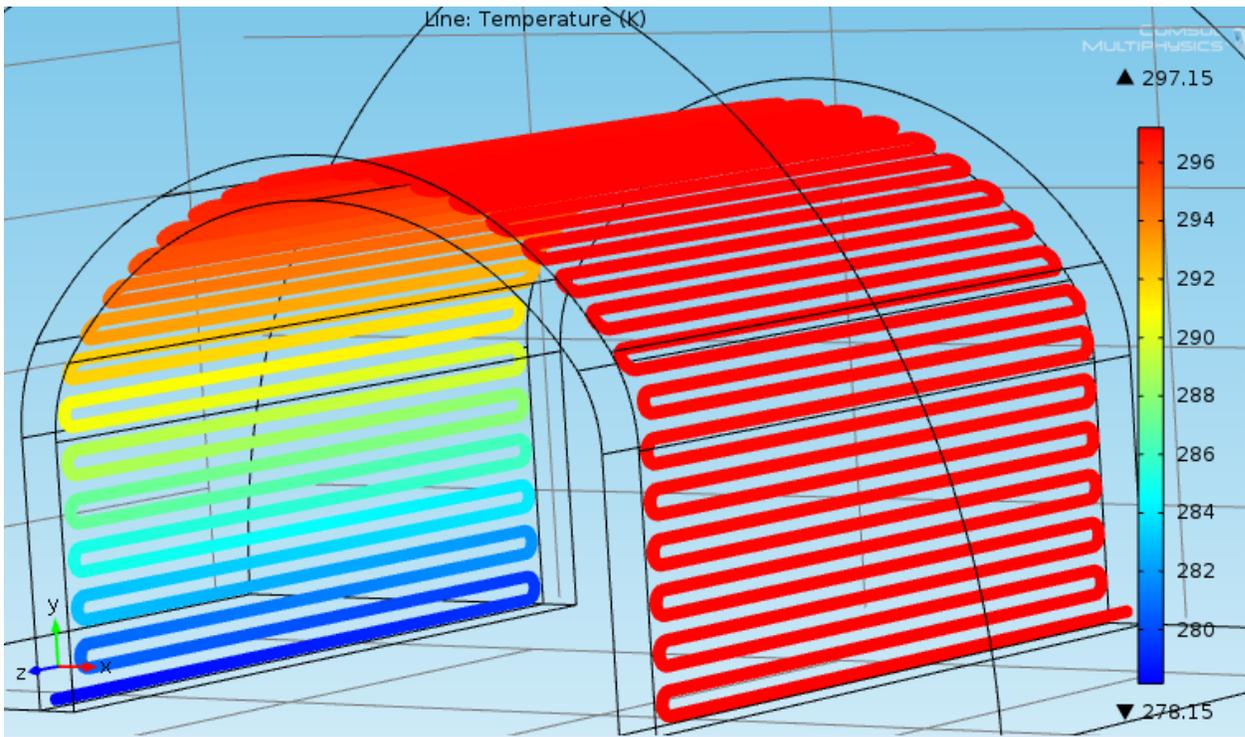


ILUSTRACIÓN 5.4: IMAGEN DE TEMPERATURAS DEL AGUA AL INTERIOR DEL SERPENTÍN PARA EL CASO DE SEPARACIÓN DE 30 [CM] CON VELOCIDAD DE FLUJO DE 0,1 M/S EN VERANO

En la Ilustración 5.5 se observa que en el lado izquierdo en los primeros metros de serpentín hay transferencia de calor hacia el agua. Luego el agua alcanza su temperatura máxima y solo hay transferencia hacia la tierra como se observa en el lado derecho.

Por los análisis anteriores se recomienda utilizar la configuración con separación de 30 centímetros pero a velocidades de flujo de agua altas. A pesar que se utilizará mayor energía en hacer circular el agua por las pérdidas de presión, esta se compensa por la energía térmica ganada. Una bomba estándar de 1.000 [W] de potencia es capaz de levantar 1,5 bares de presión con caudales de 10 litros por minuto. El peor caso estudiado es para la configuración con separación de 30 centímetros con un caudal de 9,8 litros por minuto en invierno donde la pérdida de presión es de 1,2 bares. Caso en el cual la ganancia térmica es de casi 7.000 Watts.

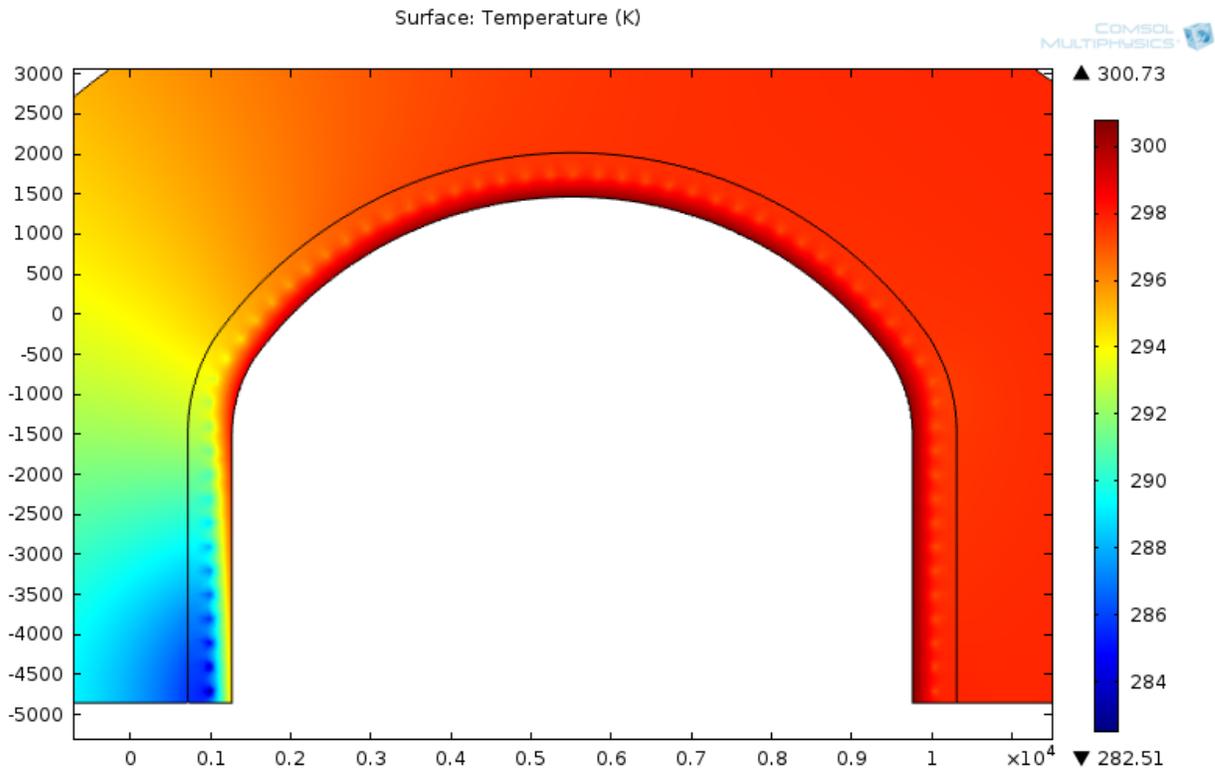


ILUSTRACIÓN 5.5: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL SUELO Y EL CONCRETO PARA SEPRACIÓN DE TUBOS DE 30 [CM] A 0,1 [M/S] EN VERANO

5.5. CONSIDERACIONES FÍSICA DE LOS MODELOS

La modelación numérica realizada con Comsol es bastante útil para resolver sistemas complejos como es que se estudia, sin embargo hay ciertos puntos que pueden generar alteraciones en los cálculos. Por esto no se puede asegurar que los valores obtenidos sean completamente exactos, aunque son muy útiles como una aproximación al comportamiento del sistema.

Por ejemplo la resistencia térmica de contacto en la interfaz de dos materiales, aunque puede ser poco significativa de todas formas influye en la transferencia de calor. En el sistema en estudio se tiene una resistencia térmica de contacto en la interfaz del suelo y el concreto donde en el caso real la unión de los materiales no es perfecta, sino que se generan micro espacios de aire entre los materiales. El tamaño de la resistencia depende de las rugosidades de los materiales que están en contacto pero la mejor manera de calcular su valor es de manera experimental. En el caso en estudio puede provocar que los valores de transferencia obtenidos sean un poco mayor al real si es que se considerara la resistencia térmica de contacto.

La transferencia del suelo también puede tener alteraciones debido a que la tierra es una mezcla de distintos materiales los cuales pueden estar presentes en distintas proporciones y también depende de la humedad del suelo y su porosidad. La mejor forma de obtener valores exactos de la conductividad de un tipo de suelo es de manera experimental. Si bien se utiliza la conductividad para la grava gruesa presente en gran

parte de los estratos de Santiago, en caso de implementar el sistema se encontrarán distintos tipos de suelo a lo largo de la construcción del túnel.

Por otro lado el modelo no considera la presencia de los fierros del hormigón armado de la estructura de concreto lo cual puede generar diferencias con el valor real. Sin embargo estas diferencias deberían ser positivas debido a que el fierro de construcción para hacer las jaulas del hormigón armado, tiene una mucho mejor conductividad que el concreto beneficiando la transferencia de calor a través de la estructura.

Y un último punto que puede generar errores negativos en los resultados es que en caso de implementar el sistema de serpentines embebido a lo largo de un túnel se produce una disminución de la temperatura del aire al interior del túnel. Por esto se genera una disminución de la transferencia de calor a medida que el aire avanza debido a la disminución de la diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

6. CONCLUSIONES

Primero se logra hacer una estimación del calor absorbido por metro de tubo para verificar la ventaja de utilizar tubos embebidos en el concreto de la estructura del túnel versus utilizar tubos instalados por fuera de la estructura en contacto directo con el aire caliente del túnel. Incluso se puede suponer en primera instancia que los tubos en contacto con el aire al ser de acero tendrían una buena absorción de calor, pero el cálculo demuestra que los tubos embebidos absorben más del doble de calor que los tubos en contacto con el aire.

Constructivamente el sistema de embeber los tubos es bastante más sencillo que instalar los tubos por afuera de la estructura en contacto con el aire. Esto debido a que de la forma embebida los tubos solo se amarran con alambre a la jaula de fierro del hormigón armado y luego quedan contenidos por el concreto cuando es vertido. En cambio para instalar los tubos por fuera de la estructura es necesario instalar soportes y perforar el concreto lo cual es más complicado.

Para hacer el diseño del modelo se consigue información y planos reales del túnel de la línea 4 del Metro de Santiago haciendo que el estudio y modelación sea más real que si se suponen las dimensiones y condiciones de operación de un túnel cualquiera. Tener las temperaturas del aire al interior del túnel de invierno y verano permiten estudiar el peor y el mejor de los casos de absorción de calor respectivamente.

El diseño del serpentín y sus condiciones de operación se logra gracias a la bibliografía de papers y normas de sistemas geotermales y funcionamiento de bombas de calor como el paper de Brandl, la norma alemana VDI 4640 y la norma IGSHPA. Por lo que se utilizan parámetros reales como la velocidad de flujo del agua, el diámetro y material de los tubos absorbentes y la temperatura de entrada del agua fría al sistema.

Sobre los distintos casos estudiados se diseñan tres configuraciones distintas de tubos y se modelan para cinco velocidades de flujo distintas y para dos estaciones del año. De esta forma se logra abarcar un rango amplio de posibilidades de funcionamiento y diseño pudiendo entender ciertos comportamientos y tendencias características del sistema. Con los distintos sistemas, en 10 metros de túnel, se logra absorber desde 1.800 hasta 6.900 watts en invierno, y desde 2.600 hasta 10.300 watts de calor en verano. Cabe mencionar que en promedio el 75% del calor absorbido proviene del aire caliente del túnel, por lo que los valores presentados no serían tan altos en túneles donde la temperatura en su interior no es tan alta como la que poseen los túneles del metro de Santiago.

Para mostrar de forma práctica el potencial del sistema de tubos embebidos se hace una comparación con la demanda térmica para calefacción del nuevo edificio de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, el edificio Beauchef 851. Se logra mostrar que con 400 metros de túnel que tengan instalado el sistema de tubos embebidos, se puede calefaccionar completamente el edificio en julio, mes de mayor demanda térmica del año.

Por otro lado como beneficio secundario, se disminuye la temperatura del túnel del metro haciendo más agradable los viajes de los usuarios del servicio de transporte. Con un kilómetro de túnel que tenga embebidos los tubos, la temperatura del aire se puede llegar a reducir en 5°C en invierno y en 8°C en verano. El beneficio es enorme sobre todo en la época estival donde el aire del túnel puede alcanzar valores cercanos a los 40°C.

Como tema de estudio propuesto se puede estudiar el diseño y la interacción de dos o más serpentines contiguos y ver el comportamiento del sistema para extensiones largas de túnel.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. **Brandl, H.** 2, s.l. : Géotechnique, 2006, Vol. 56, págs. 81-122.
2. **Tarbuck, Edward J. y Lutgens, Frederick K.** *Ciencias de la Tierra*. Madrid : Pearson Educación S.A., 2005.
3. *VDI 4640-Thermal use of the underground*. **Verein Deutscher Ingenieure**. Düsseldorf : Verein Deutscher Ingenieure, 2010.
4. **Moran, Michael J. y Shapiro, Howard N.** *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th Edition. England : John Wiley & Sons Ltd., 2006.
5. **Cengel, Yunus A.** *Transferencia de Calor*. Segunda edición. México : McGraw-Hill Interamericana, 2004.
6. **Espinoza, Carlos.** Ingeniero Civil Mecánico. *Ingeniero de vias y RAMS*. Metro de Santiago, Chile.
7. **Metro S.A.** *Licitación Pública Internacional Suministro y Mantenimiento Sistema Ventilación Forzada*.
8. *Design and installation guide*. **(IGSHPA), International Ground Source Heat Pump Association**. Oklahoma State University, USA : s.n., 2009.
9. **Bravo Arata, Cristóbal Andrés.** *Mediciones en Condiciones de Operación del Sistema de Aprovechamiento Geotérmico de Baja Entalpía del Edificio Beauchef 851*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago de Chile : s.n., 2014. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.

ANEXO A

Estacion	Separacion Tubos [cm]	Largo serpentín [m]	Velocidad Flujo [m/s]	Caudal fluido [l/min]	Temp salida [°C]	Dif. De Temp. [°C]	Calor Tubos [W]	Calor por metro de tubo [W/m]	Calor por metro de túnel [W/m]	CalorTúnel [W]	Aporte Túnel %	Presion salida [Pa]	Dif Presion [Pa]	Dif Presion [bar]
Invierno	30	578,5	0,1	1,96	18,16	13,16	1.800,77	3,1	180,1	1533,94	85%	106.297	4972	0,04972
			0,2	3,92	18,19	13,19	3.623,70	6,3	362,4	2188,11	60%	125.047	23722	0,23722
			0,3	5,88	18,14	13,14	5.418,84	9,4	541,9	3004,35	55%	149.940	48615	0,48615
			0,4	7,84	16,85	11,85	6.511,03	11,3	651,1	3929,12	60%	181.935	80610	0,80610
			0,5	9,81	15,16	10,16	6.976,09	12,1	697,6	4485,25	64%	220.520	119195	1,19195
	50	345,0	0,1	1,96	18,48	13,48	1.848,86	5,4	184,9	1452,66	79%	104.349	3024	0,03024
			0,2	3,92	18,34	13,34	3.669,11	10,6	366,9	2333,21	64%	115.561	14236	0,14236
			0,3	5,88	16,87	11,87	4.896,24	14,2	489,6	3167,30	65%	130.715	29390	0,29390
			0,4	7,84	14,45	9,45	5.195,16	15,1	519,5	3855,92	74%	149.893	48568	0,48568
			0,5	9,81	13,19	8,19	5.629,31	16,3	562,9	4147,90	74%	172.903	71578	0,71578
	70	254,8	0,1	1,96	18,62	13,62	1.869,52	7,3	187,0	1417,97	76%	103.601	2276	0,02276
			0,2	3,92	17,72	12,72	3.499,51	13,7	350,0	2400,11	69%	111.893	10568	0,10568
			0,3	5,88	15,09	10,09	4.165,43	16,3	416,5	3173,65	76%	123.229	21904	0,21904
			0,4	7,84	13,47	8,47	4.662,21	18,3	466,2	3523,13	76%	137.348	36023	0,36023
			0,5	9,81	13,43	8,43	4.763,41	18,7	476,3	3839,65	81%	154.436	53111	0,53111
Verano	30	578,5	0,1	1,96	23,99	18,99	2.602,64	4,5	260,3	4121,20	158%	105.918	4593	0,04593
			0,2	3,92	22,08	17,08	4.693,50	8,1	469,4	5387,83	115%	124.571	23246	0,23246
			0,3	5,88	21,78	16,78	6.916,92	12,0	691,7	6099,95	88%	148.686	47361	0,47361
			0,4	7,84	21,46	16,46	9.042,23	15,6	904,2	6857,43	76%	179.801	78476	0,78476
			0,5	9,81	20,03	15,03	10.320,15	17,8	1032,0	7639,43	74%	217.900	116575	1,16575
	50	345,0	0,1	1,96	25,12	20,12	2.760,91	8,0	276,1	3493,43	127%	104.135	2810	0,02810
			0,2	3,92	22,98	17,98	4.943,12	14,3	494,3	4808,93	97%	115.248	13923	0,13923
			0,3	5,88	21,84	16,84	6.942,02	20,1	694,2	5642,56	81%	129.892	28567	0,28567
			0,4	7,84	19,75	14,75	8.110,32	23,5	811,0	6465,18	80%	148.742	47417	0,47417
			0,5	9,81	17,63	12,63	8.680,20	25,2	868,0	7023,43	81%	171.567	70242	0,70242
	70	254,8	0,1	1,96	25,25	20,25	2.780,04	10,9	278,0	3226,36	116%	103.429	2104	0,02104
			0,2	3,92	22,74	17,74	4.876,87	19,1	487,7	4457,13	91%	111.663	10338	0,10338
			0,3	5,88	20,66	15,66	6.457,51	25,3	645,8	5358,13	83%	122.643	21318	0,21318
			0,4	7,84	18,11	13,11	7.212,65	28,3	721,3	5984,97	83%	136.614	35289	0,35289
			0,5	9,81	16,02	11,02	7.573,98	29,7	757,4	6436,20	85%	153.539	52214	0,52214

Estacion	Separacion Tubos [cm]	Largo serpentín [m]	Velocidad Flujo [m/s]	Temp. Salida túnel [°C]	Dif de temp en 10 m de túnel [°C]	Dif de temp en 100 m de túnel [°C]	Dif de temp en 1 Km de túnel [°C]	Energía para un mes con 10 metros [J]	Energía para un mes con 10 metros [kWh]	Energía para un mes con 100 metros [kWh]	Aporte a Beauchef 851 en Julio	Aporte a Beauchef 851 en Enero	
Invierno	30	578,5	0,1	19,9831	-0,017	-0,169	-1,69	4.667.586.042	1.297	12.966	7,43%		
			0,2	19,9759	-0,024	-0,241	-2,41	9.392.626.305	2.609	26.091	14,94%		
			0,3	19,9670	-0,033	-0,330	-3,30	14.045.639.268	3.902	39.016	22,34%		
			0,4	19,9568	-0,043	-0,432	-4,32	16.876.599.532	4.688	46.879	26,85%		
			0,5	19,9507	-0,049	-0,493	-4,93	18.082.017.167	5.023	50.228	28,77%		
	50	345,0	0,1	19,9840	-0,016	-0,160	-1,60	4.792.254.788	1.331	13.312	7,62%		
			0,2	19,9743	-0,026	-0,257	-2,57	9.510.336.723	2.642	26.418	15,13%		
			0,3	19,9652	-0,035	-0,348	-3,48	12.691.047.781	3.525	35.253	20,19%		
			0,4	19,9576	-0,042	-0,424	-4,24	13.465.844.948	3.741	37.405	21,42%		
			0,5	19,9544	-0,046	-0,456	-4,56	14.591.176.989	4.053	40.531	23,21%		
	70	254,8	0,1	19,9844	-0,016	-0,156	-1,56	4.845.797.836	1.346	13.461	7,71%		
			0,2	19,9736	-0,026	-0,264	-2,64	9.070.738.862	2.520	25.196	14,43%		
			0,3	19,9651	-0,035	-0,349	-3,49	10.796.792.746	2.999	29.991	17,18%		
			0,4	19,9613	-0,039	-0,387	-3,87	12.084.453.374	3.357	33.568	19,22%		
			0,5	19,9578	-0,042	-0,422	-4,22	12.346.767.922	3.430	34.297	19,64%		
Verano	30	578,5	0,1	29,9547	-0,045	-0,453	-4,53	6.746.049.723	1.874	18.739	8219%		
			0,2	29,9407	-0,059	-0,593	-5,93	12.165.556.614	3.379	33.793	14822%		
			0,3	29,9329	-0,067	-0,671	-6,71	17.928.651.974	4.980	49.802	21843%		
			0,4	29,9246	-0,075	-0,754	-7,54	23.437.470.347	6.510	65.104	28554%		
			0,5	29,9160	-0,084	-0,840	-8,40	26.749.819.909	7.431	74.305	32590%		
	50	345,0	0,1	29,9616	-0,038	-0,384	-3,84	7.156.272.007	1.988	19.879	8719%		
			0,2	29,9471	-0,053	-0,529	-5,29	12.812.560.301	3.559	35.590	15610%		
			0,3	29,9379	-0,062	-0,621	-6,21	17.993.710.371	4.998	49.983	21922%		
			0,4	29,9289	-0,071	-0,711	-7,11	21.021.943.971	5.839	58.394	25612%		
			0,5	29,9228	-0,077	-0,772	-7,72	22.499.080.862	6.250	62.497	27411%		
	70	254,8	0,1	29,9645	-0,035	-0,355	-3,55	7.205.856.682	2.002	20.016	8779%		
			0,2	29,9510	-0,049	-0,490	-4,90	12.640.848.284	3.511	35.113	15401%		
			0,3	29,9411	-0,059	-0,589	-5,89	16.737.872.556	4.649	46.494	20392%		
			0,4	29,9342	-0,066	-0,658	-6,58	18.695.182.787	5.193	51.931	22777%		
			0,5	29,9292	-0,071	-0,708	-7,08	19.631.759.867	5.453	54.533	23918%		