

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Ramón Díaz N.

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN TESTIGOS DE
ROCA**



GABRIEL CÁCERES CROVETTO

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

SEPTIEMBRE 2020

Agradecimientos

El apoyo incondicional de mi familia y amigos ha sido siempre mi principal respaldo. Destaco por sobre todas las cosas el esfuerzo que hicieron mis padres, Ximena y Carlos, para que yo pudiera tener acceso a estudiar una carrera universitaria. Los quiero mucho y les agradezco de corazón.

Agradezco también a Ramón, mi profesor guía, quien tuvo la gentileza de hacerme partícipe de su proyecto de geotermia de muy baja entalpía. Muchas gracias por su interés y paciencia.

Me gustaría hacer mención de los trabajadores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica que colaboraron con este trabajo, especialmente a Don Edgardo Elorza, instrumentista del DIMET, quien tuvo una voluntad de oro para ayudarme cada vez que lo necesité. Gracias por su amabilidad y disposición.

A Juan Reyes, alumno memorista de Ingeniería Civil Metalúrgica de la UdeC, nuestro experto informática y medición de temperatura. No puedo agradecer lo suficiente todo el apoyo y colaboración brindada durante el desarrollo de esta memoria. Conocer una persona tan destacable por su conocimiento y que, al mismo tiempo, tenga una gran voluntad por ayudar a los demás, es poco usual. Con mucho cariño te deseo lo mejor en tu vida y tu carrera profesional.

Finalmente, al equipo de trabajo de la Unidad de Modelización Hidrogeofísica y de Ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo, les agradezco por haberme acogido con tanta amabilidad durante mi estadía en España, por haberme introducido a la utilización de la herramienta de modelización “COMSOL Multiphysics” y por permitirme hacer uso de su licencia para este trabajo.

Resumen

El presente documento detalla el desarrollo de un experimento realizado con tecnología de bajo costo para determinar la conductividad térmica en testigos de roca.

La configuración para este experimento consiste en generar un flujo de calor axial a lo largo de un testigo de roca de conductividad térmica desconocida, posicionado entre dos cilindros de conductividad térmica conocida. Mediante el uso de sensores dispuestos transversalmente a lo largo del sistema, se mide la fluctuación de la temperatura en los extremos de cada uno de sus componentes.

La medida en tiempo real de temperaturas es realizada con sensores ds18b20, gestionados mediante un Arduino, y almacenada en un ordenador portátil. Los datos son analizados e interpretados según un modelo fisicomatemático analítico de transferencia de calor por conducción, seleccionado previamente en función de los objetivos propuestos mediante una revisión bibliográfica.

El resultado experimental de conductividad térmica obtenido para el testigo de roca (3,02 W/mK) es comprobado de forma satisfactoria por dos vías. La primera comprobación se realiza mediante la comparación con valores documentados por diferentes investigadores. En segundo lugar, se realizan simulaciones numéricas con el software COMSOL Multiphysics.

Finalmente, se concluye que la metodología empleada y la instrumentación de bajo costo seleccionada permite obtener resultados adecuados en la caracterización de la conductividad térmica en testigos de roca y pueden ser empleados con ciertas garantías de confiabilidad con un costo de implementación bajo (61.362 CLP).

Abstract

This document details the development of an experiment carried out with low-cost technology to determine the thermal conductivity of rock cores.

The setup for this experiment consists of generating a lengthwise heat flow using a heat source and focusing it through a core of rock of unknown thermal conductivity, positioned between two cylinders of known thermal conductivity. By using sensors arranged transversally along the system, the temperature fluctuation at the ends of each of its components is measured.

The real-time temperature measurement is performed by ds18b20 sensors, managed by an Arduino, and stored in a laptop. The data are analyzed and interpreted according an analytical model of heat transfer by conduction, previously selected according to the objectives proposed by means of a bibliographic review.

The experimental results of thermal conductivity obtained for the rock core (3,02 W/mK) are verified by two methods. The first check is made by comparing with values documented by different researchers. For the same means, a numerical simulation is made with COMSOL Multiphysics software.

Finally, it is concluded that the methodology used and the low-cost instrumentation selected are adequate to determine the thermal conductivity of rocks, and can be used with certain guarantees of reliability with a low implementation cost (inferior to 61.362CLP).

Índice de contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Energía en la industria minera	1
1.2	Energía geotérmica de muy baja entalpía en minería	2
1.3	Propiedades térmicas del terreno	4
1.4	Hipótesis del trabajo	6
1.5	Objetivos de la investigación	6
1.5.1	Objetivo general	6
1.5.2	Objetivos específicos	6
2	Fundamentos del estudio	7
2.1	Fundamentos de geotermia	7
2.1.1	Definición y clasificación de la energía geotérmica	7
2.1.2	La bomba de calor geotérmica	8
2.2	Energía geotérmica de muy baja entalpía en minas	10
2.2.1	Antecedentes generales	10
2.2.2	Principales fuentes de calor dentro de la mina	12
2.2.3	Aplicaciones de la energía geotérmica de muy baja entalpía en minería	12
2.3	Determinación de la conductividad térmica de rocas	14
2.3.1	Métodos teóricos	14
2.3.1.1	Métodos analíticos	15
2.3.1.2	Métodos numéricos	15
2.3.2	Métodos experimentales	16
2.3.2.1	Métodos de laboratorio.....	16
2.3.2.2	Métodos in-situ	19
2.4	Fundamentos de transferencia de calor	20
2.4.1	Propiedades térmicas.....	20
2.4.2	Modelos de fuentes de calor	22
2.4.3	Mecanismos de transferencia de calor	23
2.4.3.1	Transferencia de calor por convección	23
2.4.3.2	Transferencia de calor por radiación	24
2.4.3.3	Transferencia de calor por conducción	24
2.4.4	Ecuación fundamental de la conducción de calor	24
2.4.5	Ley de Fourier para flujos de calor a través de paredes planas	28

3	Determinación experimental de la conductividad térmica	30
3.1	Introducción	30
3.2	Diseño y planificación del experimento.....	30
3.3	Materiales utilizados	31
3.4	Desarrollo del experimento	35
3.4.1	Obtención de la muestra	35
3.4.2	Preparación de la muestra	35
3.4.3	Preparación de la fuente de calor	36
3.4.4	Preparación de los cilindros de conductividad conocida	37
3.4.5	Ensamblaje de los componentes del sistema	38
3.4.6	Conexión y programación del sistema de monitoreo	39
3.4.7	Toma de datos	40
4	Análisis y discusión de resultados	43
4.1	Conductividad térmica experimental	43
4.2	Simulación numérica del experimento con testigos de roca	45
5	Conclusiones	53
6	Bibliografía	55
7	Anexos	62
7.1	Anexo 1	62
7.2	Anexo 2	65
7.3	Anexo 3	66
7.4	Anexo 4	68

Índice de tablas

Tabla 1: Diferentes equipos para determinar conductividad térmica de materiales.	5
Tabla 2: Resumen de los resultados del estudio expuesto, modificado de McLellan et al., (2012). ..	11
Tabla 3: Métodos de determinación de conductividad térmica en rocas.	17
Tabla 4: Valores de conductividad térmica de materiales comunes a temperatura ambiente (Cengel, 2006).....	21
Tabla 5: Temperatura promedio durante la fase estable para ambas experiencias.	42
Tabla 6: Resultados de las experiencias 1 y 2 para conductividad térmica k.	43
Tabla 7: Parámetros Geométricos impuestos al modelo.	46
Tabla 8: Propiedades del material impuestas en el modelo.	46
Tabla 9: Temperaturas simuladas en cada sensor para cada experiencia.....	49
Tabla 10: Error relativo entre los valores medidos y los simulados para el experimento 1.	51
Tabla 11: Error relativo entre los valores medidos y los simulados para el experimento 2.	51
Tabla 12: Especificaciones técnicas de los sensores ds18b20 (Maximintegrated, 2019).	62
Tabla 13: Especificaciones técnicas de la placa programable Arduino UNO (Arduino Official Store, 2020).....	62
Tabla 14: Especificaciones técnicas del PVC hidráulico (Hidr et al., 2018).	63
Tabla 15: Especificaciones técnicas del Duraluminio 2011 (Wardhani, 2015).	63
Tabla 16: Especificaciones técnicas del extruido de polietileno (Roca, 2005).	64
Tabla 17: Materiales utilizados para la conformación del experimento (con precio en CLP).	65

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de una bomba de calor, modificado de DIMPLEX, (2019).	9
Figura 2: Esquema de clasificación de los métodos de determinación de conductividad térmica. .	14
Figura 3: Diseño esquemático del experimento para testigos de roca.	31
Figura 4: Muestra de estudio para el experimento en testigos de roca.	32
Figura 5: Fuente de calor utilizada en el experimento para testigos de roca.	32
Figura 6: Cilindros de Duraluminio 2011.	32
Figura 7: Tubería de PVC de 5 cm de diámetro interno.	33
Figura 8: Tubo de espuma de polietileno (aislante térmico).	33
Figura 9: Placa programable Arduino UNO.	34
Figura 10: Sensor digital ds18b20.	34
Figura 11: Recuperación de testigo de roca.	35
Figura 12: Procedimiento de ajuste del espesor de la muestra.	36
Figura 13: Selección del diámetro de PVC a utilizar en función del diámetro del testigo de roca. ..	36
Figura 14: Conexión adaptada a la fuente de calor.	37
Figura 15: Adaptación de los cilindros de Duraluminio al diámetro del sistema.	37
Figura 16: Surco confeccionado en los cilindros de Duraluminio 2011 para el posicionamiento de los sensores dentro del sistema.	38
Figura 17: Posicionamiento del sensor para mejorar el contacto entre los componentes del sistema.	38
Figura 18: Confección de los orificios en la tubería de PVC para el posicionamiento de los sensores.	38
Figura 19: Disposición final de los componentes del experimento para testigos de roca.	39
Figura 20: Esquema de conexión de los sensores a la placa Arduino.	40
Figura 21: Gráfico obtenido de la experiencia 1 (°C v/s segundos).	41
Figura 22: Gráfico obtenido de la experiencia 2 (°C v/s segundos).	42
Figura 23: Comparación del valor de k obtenido experimentalmente con los rangos de valores recopilados bibliográficamente.	45
Figura 24: Geometría obtenida para el sistema.	46
Figura 25: Condiciones de borde aplicadas al modelo	47
Figura 26: Simulación de la primera experiencia en COMSOL Multiphysics.	48
Figura 27: Simulación de la segunda experiencia en COMSOL Multiphysics.	48

Figura 28: Comparación entre las temperaturas experimentales y las simuladas para la experiencia 1..... 49

Figura 29: Comparación entre las temperaturas experimentales y las simuladas para la experiencia 2..... 50



Nomenclatura

Símbolo o abreviación	Significado o Equivalencia	Unidad de medida
GEI	Gases de efecto invernadero	-
EGMBE	Energía Geotérmica de muy baja entalpía	-
GMBE	Geotermia de muy baja entalpía	-
GHP	Guarded hot plate	-
TCS	Thermal conductivity scanner	-
TRT	Thermal response test	-
DTRT	Distributed thermal response test	-
GSHP	Geothermal system heat pump	-
MEF	Método de elementos finitos	-
	Conductividad térmica	W/mK
	Área	m ²
	Flujo de calor	W/m ²
	Temperatura	K
	Tiempo	s
	Energía térmica	J
Δ	Diferencia de temperaturas	K
	Potencia	W
	Radio	m
	Espesor	m
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección	W/m ² K
	Densidad	kg/m ³

Símbolo o abreviación	Significado o Equivalencia	Unidad de medida
	Calor específico	J/kgK
α	Difusividad térmica	m ² /s
\dot{Q}	Energía generada	W/m ³
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura	K/m
Q	Energía almacenada	W
	Coordenada x	-
	Coordenada y	-
	Coordenada z	-
	Intervalo de tiempo	s
	Error relativo	%
δ	Valor teórico	-
	Valor experimental	-

1 Introducción

1.1 Energía en la industria minera

El empleo de energía ha sido, desde siempre, un pilar fundamental en el desarrollo económico mundial (Merino, 2007), siendo los combustibles fósiles, contaminantes y finitos, los más utilizados en este proceso (Mata et al., 2012). El importante incremento de la población mundial que se ha constatado durante el desarrollo del siglo XXI ha implicado que el consumo de estos combustibles y, por ende, que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se eleven de forma notable (Avtar et al., 2019). A modo de ejemplo, en 2018, aproximadamente el 75% de la demanda energética mundial se suple mediante la explotación de combustibles fósiles (Gielen et al., 2019).

La explotación masiva de combustibles fósiles para su utilización en la industria es la causante de numerosas problemáticas medioambientales que afectan al planeta Tierra en la actualidad (Fraga & Martínez-Ageitos, 2007).

Concretamente, el calentamiento global generado por las emisiones de GEI ha desencadenado una escasez de recursos hídricos a escala doméstica e industrial y ha generado una pérdida importante de la biodiversidad en prácticamente todos los ecosistemas del planeta (Casas, 2020; Fraga & Martínez-Ageitos, 2007). De este modo, el desarrollo de prácticas que permitan reducir la emisión de GEI en la industria se presenta como un desafío constante para la ingeniería moderna.

La utilización de energías renovables como sustituto a los combustibles fósiles en la generación de energía se presenta como una solución factible para esta problemática. Concretamente, una de las principales ventajas de su utilización, en comparación a los combustibles fósiles, es que éstas generan un impacto ambiental negativo menor (Línea Verde, 2018).

Históricamente, la demanda energética de la industria minera se ha satisfecho en gran medida mediante el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, en la actualidad, el acceso a formas de energía confiables, rentables y sostenibles es una prioridad estratégica para este sector productivo (Ernst & Young, 2014).

Las empresas mineras están sometidas a una presión cada vez mayor para abordar los desafíos modernos y cumplir con los estándares impuestos internacionalmente para lidiar con las problemáticas medioambientales del panorama global actual. Además de esto, en la actualidad, este sector productivo se enfrenta a diversos retos. La disminución de las leyes de mineral, el aumento

de la dureza de las rocas, el envejecimiento de las faenas, al alza del costo de la energía, los impuestos a la generación de carbono y el endurecimiento de las normativas y los límites permisibles para las emisiones de gases contaminantes, han llevado a las empresas mineras a incursionar en nuevas formas de reducir el costo de la energía, aumentar la eficiencia de los procesos e incorporar energías renovables en su matriz energética.

1.2 Energía geotérmica de muy baja entalpía en minería

La energía geotérmica es aquella que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra, liberado constante e inagotablemente por ésta (Eppelbaum et al., 2014). Al no depender de factores externos, este tipo de energía constituye un recurso que, de ser bien gestionado, puede permitir la obtención de energía limpia de forma continua durante todo el año (Fundación de energía de la Comunidad de Madrid, 2008).

Puntualmente, la energía geotérmica de muy baja entalpía (en adelante EGMBE) es aquella que se obtiene de zonas del subsuelo que se encuentran a temperaturas inferiores a 30°C (Trillo, 2008). Su empleo es útil y viable en casos muy diversos.

La EGMBE no puede ser utilizada en la generación de electricidad, pero puede ser utilizada para calentar un determinado espacio o para producir agua caliente sanitaria (C. Blázquez et al., 2016). Este tipo de energía presenta múltiples ventajas. En términos de uso de la tierra y emisiones de GEI, ésta presenta una huella ambiental muy baja, además de una capacidad de generar energía de forma continua (teniendo en cuenta su tasa de renovación natural) (Matek, B., Gawell, 2013; Li et al., 2015).

A escala doméstica, la EGMBE puede suplir en su totalidad la demanda energética requerida para la calefacción y el calentamiento del agua de uso sanitario (Allen & Milenic, 2003). En grandes espacios públicos, como centros de atención médica, instituciones educativas y procesos industriales que requieren el uso de calor, la EGMBE puede contribuir de forma importante a suplir esta demanda y, en algunos casos, puede suplirla completamente (Fraseri, 2006).

Considerando que una mina es otro tipo de espacio de gran envergadura que puede llegar a contener en su interior a un elevado número de trabajadores, durante periodos de tiempo prolongados, la utilización de la EGMBE puede ser de utilidad para una empresa minera que busque reducir sus costos energéticos y disminuir su huella de carbono. Además, si se considera que una mina subterránea se presenta como un acceso directo al calor del subsuelo (García de la Noceda, 2008), las infraestructuras mineras se ubican en un ambiente idóneo para aprovechar el flujo de calor liberado por la Tierra.

Concretamente, se considera que en la mayor parte de las regiones del planeta, la temperatura de la roca varía entre los 25°C y los 30°C, a tan solo 500 m de profundidad, y que la temperatura del terreno solo aumenta pasado esta profundidad (Trillo & Angulo, 2008). Considerando que el principal costo de un sistema de aprovechamiento geotérmico está asociado a la realización de la perforación requerida para alcanzar una profundidad adecuada (Mac-Lean et al., 2018), la instalación de un sistemas de bomba de calor geotérmica dentro de una mina conllevaría una inversión inicial menor que en la mayoría de los casos, si se utilizan las infraestructuras mineras preexistentes.

La mayoría de las minas operativas tienen necesidades de calefacción y/o refrigeración dentro de edificios administrativos, campamentos residenciales o al interior de la faena. Los sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP) tienen el potencial de satisfacer este tipo de necesidad, puesto que operan con eficiencias elevadas (300% a 600%). Asimismo, su tamaño varía en función del requerimiento de calor. Las unidades modulares individuales son utilizadas para habitaciones individuales. Del mismo modo, las unidades del tamaño de un distrito, pueden generar suficiente capacidad para servir a grandes comunidades. Así aprovechar los recursos geotérmicos puede proporcionar energía de bajo costo y mejorar la sostenibilidad operativa.

Desde el punto de vista operativo, una vez que se realiza la inversión inicial, el costo de la EGMBE es menor que el de los combustibles fósiles convencionales, especialmente en lugares remotos donde la logística de suministro de combustible es complicada y costosa (Boynnton., 2019). Además de conllevar una disminución en los gastos de energía, el uso de la EGMBE presenta diversas ventajas.

El flujo de calor excesivo en las galerías de minas subterráneas constituye un peligro para la seguridad de los trabajadores de la mina. Sin embargo, la recuperación de este calor de puede ser valiosa si éste se reutiliza.

La adición de calor a procesos minerales específicos puede mejorar significativamente los rendimientos y la eficiencia de producción (Patsa, Zyl, Zarrouk, et al., 2015), lo que puede transformar un problema en una oportunidad para generar valor añadido y reducir los costos de operación para la operación minera.

Tras el cierre de una mina, la infraestructura en desuso puede transformarse en un reservorio de energía geotérmica de muy baja entalpía y suministrar energía o calor a las comunidades cercanas como un flujo de efectivo adicional posterior a la mina.

A pesar de estos beneficios potenciales, la utilización de la EGMBE en minería aún no se ha masificado y la causa de esta falta de uso dentro de la industria no es muy clara.

Un posible factor contribuyente es la gran inversión de capital en infraestructuras iniciales que requiere la aplicación de un sistema de aprovechamiento geotérmico dentro de la mina (Boynton et al., 2019). En el caso de Chile, donde el uso de energía geotérmica todavía es incipiente, tan solo el costo de perforación se estima en 300 USD/m (Sharqawy et al., 2009), sin considerar todos los gastos asociados a la instalación del sistema.

Otra posible explicación del porqué no muchas empresas han abordado este mercado radica en que no se ha realizado una evaluación exhaustiva del potencial de la EGMBE en el país. Concretamente, la evaluación del potencial geotérmico en Chile comienza apenas el año 2018, con la formación de la denominada “Mesa de la geotermia” por parte del Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2018).

Una forma práctica para evaluar el potencial para la extracción de calor de un terreno es analizar su conductividad térmica (Rybach & Signorelli, 2010; Signorelli et al., 2007). La viabilidad de la aplicación de un sistema de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía depende en gran medida de la conductividad térmica del terreno en el que éste se emplace (Saito et al., 2014), lo que denota la relevancia de conocer las propiedades del terreno y, sobre todo, su conductividad térmica.

1.3 Propiedades térmicas del terreno

Caracterizar las propiedades térmicas del terreno es de gran relevancia en los proyectos de diseño y construcción de sistemas de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía (Saito et al., 2014). Conocer estas propiedades permite determinar la capacidad de intercambio de calor entre el terreno y el sistema y, por tanto, la capacidad de captación energética de la instalación (Fernández et al., 2013).

Los cuatro factores de mayor relevancia para el diseño de una captación son la conductividad térmica, la capacidad térmica volumétrica, la difusividad térmica y el nivel de humedad. Sin embargo, la conductividad térmica es el principal condicionante para su funcionamiento adecuado, puesto que éste es el que determina la capacidad de un material para conducir calor (Nope & de Santiago, 2014). Conocer este parámetro es fundamental para dimensionar la longitud de la perforación y determinar cuántas perforaciones son requeridas para abastecer las necesidades energéticas requeridas.

Una subestimación de la conductividad térmica, considerando que la perforación conlleva el principal costo en la instalación de un sistema de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía (300 USD/m), puede conllevar un sobre costo significativo en la perforación.

Contrariamente, sobreestimar el valor de la conductividad térmica y acortar la longitud del sondaje puede perjudicar el desempeño de la bomba de calor y condicionar el funcionamiento del sistema (Lamarche et al., 2010), provocando que los costos operativos aumenten (debido a un consumo excesivo de energía eléctrica) y que los sistemas experimenten un posible deterioro (Sanner et al. 2009).

Por tanto, conocer la conductividad térmica del terreno en donde se emplace el sistema de captación geotérmica es fundamental (C. Blázquez et al., 2017).

Sin embargo, definir este parámetro para realizar un cálculo adecuado no siempre es fácil. Los equipos disponibles en el mercado para determinar la conductividad térmica en materiales tienden a tener un costo elevado. En la tabla 1, se muestra una recopilación realizada con los diferentes equipos disponibles en el mercado para determinar la conductividad térmica de los materiales, destacando sus precios y las páginas web en las que estos se encuentran disponibles.

Tabla 1: Diferentes equipos para determinar conductividad térmica de materiales.

Equipo	Valor (USD)	Página web
TBTTCDR-1 Thermal Conductivity Testing Machine	8.000	https://t-bota.en.made-in-china.com/product/cKAJoMVvkNWS/China-TBTTCDR-1-Thermal-Conductivity-Testing-Machine.html
EIE Thermal Conductivity Apparatus for Aac Blocks	8.000 – 12.000	https://alibaba.com/product-detail/Thermal-Conductivity-Apparatus-For-AacBlocks_50008322757.html
CD-DR3030 Heat Flow Meter, Thermal Conductivity Tester	7.500 – 8.000	https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/qMgEybfANjtY/China-Heat-Flow-Meter-Thermal-Conductivity-Tester.html
SSX-DR300 Heat flow meter and thermal conductivity measurement tester	5.500 – 6.500	https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/LBQmvcydrFWt/China-Heat-Flow-Meter.html

Thermal Conductivity Kit + 11.295 <https://thermalconductivitykit.com/>
Keithley 2401 Source
Measure Unit

1.4 Hipótesis del trabajo

Las dificultades que plantea el estudio de las propiedades térmicas del terreno son una barrera para el desarrollo de la energía geotérmica de muy baja entalpía en minería e impiden que ésta juegue un rol más activo en la matriz energética de la industria.

En este trabajo, se plantea desarrollar un método experimental de bajo costo para la determinación de la conductividad térmica de muestras fáciles de obtener en una operación minera, como son los testigos de roca.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta memoria de título es diseñar e implementar un dispositivo que permita la determinación de la conductividad térmica de testigos de roca, a bajo costo.

1.5.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los distintos métodos experimentales preexistentes para la determinación de la conductividad térmica en rocas.
2. Determinar los métodos más adecuados para este tipo de material.
3. Diseñar un dispositivo viable a escala de laboratorio para determinar la conductividad térmica en testigos de roca.
4. Implementar el dispositivo diseñado y realizar experimentos a escala de laboratorio.
5. Definir una metodología para la comprobación de los resultados obtenidos experimentalmente.

2 Fundamentos del estudio

2.1 Fundamentos de geotermia

En este capítulo se presenta una revisión de los fundamentos de la energía geotérmica de muy baja entalpía y los fenómenos de transferencia de calor en rocas, así como de los elementos que conforman un sistema de aprovechamiento de muy baja entalpía y los procesos más relevantes implicados en su funcionamiento.

2.1.1 Definición y clasificación de la energía geotérmica

El planeta Tierra está compuesto por tres grandes capas que poseen diferente composición y rangos de temperatura; núcleo, manto y corteza, las que en su conjunto se denominan Geósfera (Tarbuck & Lutgens, 2018). Cada una de estas capas posee una temperatura diferente, siendo las capas más internas de la Tierra aquéllas que alcanzan una mayor temperatura debido al efecto del gradiente geotérmico, término que define el aumento de la temperatura en función de la profundidad.

El núcleo terrestre constituye la esfera central de la Tierra. Está formado por una parte exterior en estado líquido y una parte interna en estado sólido. Su temperatura supera los 4.000°C.

El manto terrestre supone aproximadamente el 84% del volumen del planeta. Las rocas que lo componen son en su mayoría silicatos que se encuentran en estado sólido al acercarse a la superficie, donde la temperatura es cercana a los 1.000°C, y en estado plástico al acercarse al núcleo, donde la temperatura puede alcanzar los 3.000°C.

La corteza terrestre corresponde a la capa externa de la tierra. Su temperatura va desde los 1000°C en su contacto con el manto hasta los 15°C en la superficie.

La Energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Esta definición oficial de la norma alemana (VDI 4640) ha sido adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC) e indica que la energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

Los estudios en el ámbito del aprovechamiento de la energía geotérmica se centran en la parte más superficial de la corteza terrestre, debido a que este es la única parte accesible con la tecnología actual (Trillo & Angulo, 2008).

La energía geotérmica se clasifica en 4 grupos fundamentales según su entalpía o temperatura (Trillo & Angulo, 2008):

Energía geotérmica de alta entalpía: temperatura superior a 150°C. Se utiliza, principalmente, para la generación de electricidad.

Energía geotérmica de media entalpía: temperatura varía entre los 70 y los 150°C. Presenta diversos usos, entre los que destacan los sistemas de calefacción, procesamiento de papel y secado de madera.

Energía geotérmica de baja entalpía: temperatura inferior a 70°C. Se utiliza principalmente en sistemas de calefacción.

Energía geotérmica de muy baja entalpía: temperatura inferior a 30°C. Se utiliza exclusivamente en sistemas de calefacción y obtención de agua caliente sanitaria mediante el uso de la tecnología de la bomba de calor geotérmica.

El tipo de energía geotérmica relevante para este estudio es la de muy baja entalpía, puesto que es la que se encuentra en una mina subterránea (García de la Noceda, 2008). De este modo, los capítulos dispuestos a continuación se centran en los mecanismos y procesos relacionados a este tipo de energía.

2.1.2 La bomba de calor geotérmica

Si bien el presente trabajo no se centra en el manejo de los sistemas de aprovechamiento geotérmico, la bomba de calor geotérmica es la tecnología necesaria para su funcionamiento y su principal componente.

Todos los sistemas de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía presentan componentes muy similares, con pequeñas variaciones dependiendo del medio con el que se realiza el intercambio de calor y la utilización que se le pretende dar al calor extraído. A pesar de estas posibles variaciones, el elemento primordial para la conformación de uno de estos sistemas es la bomba de calor, puesto que es la máquina térmica que se presenta como la base de todo sistema de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía (C. Blázquez et al., 2017).

El rol de la bomba de calor dentro del sistema es trasladar el calor desde el foco frío (terreno) al foco caliente (receptor de calor).

El sistema ligado al funcionamiento de la bomba de calor posee tres componentes principales. La bomba de calor geotérmica (figura 1), un subsistema de conexión a tierra, que realiza el intercambio de calor entre el terreno y la bomba de calor geotérmica, un subsistema de distribución que permite el uso del calor, bien mediante una instalación de climatización o generación de agua caliente sanitaria, que son los usos principales de la energía geotérmica de muy baja entalpía.

El subsistema de conexión a tierra más convencional (captación), está compuesto por un circuito de tuberías cerrado e insertado en el terreno por el que se hace circular, mediante una bomba, un fluido a menor temperatura que la del terreno. Debido a esta diferencia de temperatura, la transferencia de calor desde el terreno hacia el fluido se produce de forma natural (1). Cabe destacar que la eficiencia de esta transferencia de calor depende fuertemente de la conductividad térmica del medio en el que esta se realice (C. Blázquez et al., 2017), lo que enfatiza la importancia de la determinación de este parámetro.

En el subsistema de bomba de calor, más específicamente en el evaporador, el fluido procedente de la captación cede la energía al fluido que circula por el circuito interno de la bomba de calor geotérmica, provocando su calentamiento y cambio de fase a estado gaseoso (2). Posteriormente, el fluido en fase gaseosa circula hacia el compresor, que aumenta su presión y su temperatura (3). Posteriormente, este fluido gaseoso a alta presión y temperatura pasa al condensador donde cede el calor al subsistema de distribución y el fluido de la bomba de calor recupera su estado líquido (4). En la última etapa, el fluido condensado pasa a la válvula de expansión, disminuyendo su presión y temperatura (5). De este modo, el fluido de la bomba de calor vuelve a ingresar al evaporador, iniciándose un nuevo ciclo.

En el subsistema de distribución, se obtiene el agua caliente o se utiliza el calor mediante una instalación de climatización (6).

Cabe destacar que una bomba de calor geotérmica no es más que una variante de la bomba de calor tradicional, empleada cuando el foco de energía con el que se desea realizar el intercambio de calor es el subsuelo, o bien un medio térmicamente acoplado al mismo, como lo es el agua subterránea y el aire que circula a través del sistema de ventilación de la mina.

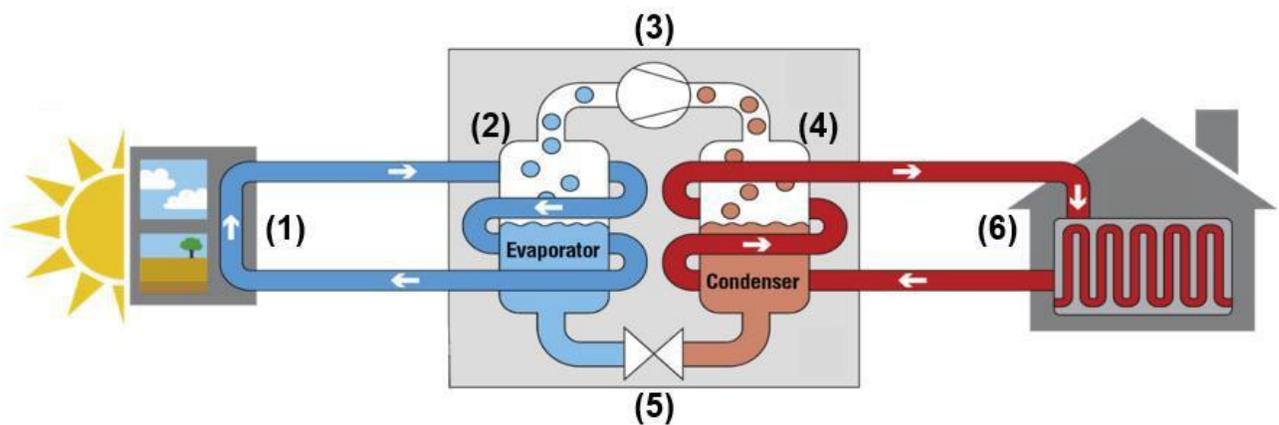


Figura 1: Esquema de una bomba de calor, modificado de DIMPLEX, (2019).

2.2 Energía geotérmica de muy baja entalpía en minas

A continuación, se presenta un análisis bibliográfico de las publicaciones a nivel mundial acerca de la utilización de este tipo de tecnologías y la energía geotérmica en minas. Se muestran los resultados de diferentes estudios efectuados en diversos países, con el fin de analizar en qué casos es viable implementar un sistema de aprovechamiento geotérmico para uso directo en la mina, y evidenciar porqué es necesario e importante conocer la conductividad térmica de la roca o material en donde se instalará el sistema.

2.2.1 Antecedentes generales

La industria minera está cada vez más interesada en el uso de fuentes de energía renovables y alternativas (Touche et al., 2011). Las dos razones más importantes son el alto costo de las fuentes de energía convencionales en lugares de difícil acceso (Patsa, Zyl & Zarrouk, 2015) y el impacto que tiene su utilización en el medio ambiente (Preene & Younger, 2014).

Según lo expuesto, la utilización de la energía geotérmica de muy baja entalpía puede ser de gran utilidad en lugares remotos, dado que es un recurso local. Sumado a esto, su aplicación en minería conlleva, en la mayoría de los casos, una disminución significativa de las emisiones directas generadas por el uso de fuentes de energía convencionales, como lo demuestran estudios realizados en diversas minas en Canadá (McLellan et al., 2012). Concretamente, en este estudio se sustituye el uso de gas natural como fuente de energía para la generación de calor dentro de las instalaciones de 13 minas del país por energía geotérmica de muy baja entalpía, resultando la totalidad de los casos en un ahorro económico promedio de más de 300.000 USD/año y una reducción promedio de las emisiones de dióxido de carbono de más de 1.500 t/año, como se muestra en la tabla 2.

De los resultados expuestos en la tabla 2, se puede apreciar que la operación que cuenta con un mayor ahorro económico al cambiarse de fuentes de combustible convencionales a energía geotérmica de muy baja entalpía es la operación minera 5, llegando a disminuir sus gastos energéticos en 572.289 USD/año, y que las 13 operaciones mineras llegan a ahorrar, en promedio, 302.063 USD/año.

En cuanto a la reducción de emisiones de carbono directas de cada mina, al igual que al ahorro económico, se puede apreciar que la mina que presenta una mayor disminución en sus emisiones es la mina número 5, con una disminución de 4.589 t/año.

Tabla 2: Resumen de los resultados del estudio expuesto, modificado de McLellan et al., (2012).

Operación	Ahorro monetario (USD/año)	Reducción de emisiones (t/año)
1	305.360	1.679
2	115.023	632
3	116.577	604
4	314.022	859
5	572.289	4.589
6	226.000	1.057
7	96.000	460
8	373.000	1.786
9	444.000	2.209
10	392.500	1.903
11	480.040	2.480
12	424.000	1.311
13	68.020	211
Promedio	302.063	1.521

De este estudio se puede inferir que la aplicación de un sistema de aprovechamiento de energía geotérmica de muy baja entalpía en una mina ubicada en una región que presenta bajas temperaturas durante el año puede conllevar ahorros de hasta medio millón de dólares por año y reducir significativamente las emisiones de gases cada año, lo que da cuenta de que, ya sea en un ámbito económico o medioambiental, la aplicación de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería tiene un potencial cuantificable. Cabe destacar que el estudio no menciona cuáles son las variables que inciden en que cada operación genere una mayor o menor reducción en los gastos energéticos y emisiones directas dentro de la mina.

Por otra parte, según dan cuenta diversos autores, entre los que destacan Gareth La Touche y Martin Preene, existen varias fuentes de calor dentro de una operación minera. La Touche, en una de sus publicaciones, destaca como principales zonas de interés para la extracción de calor en la mina, el macizo rocoso, los rellenos y el agua de drenaje (Touche et al., 2011). Asimismo, Preene identifica los botaderos de estéril como otro posible foco de interés (Preene & Younger, 2014).

Tanto las posibles aplicaciones de la energía geotérmica de muy baja entalpía en la minería, como las posibles fuentes para la extracción de calor dentro de la mina, se detallan a continuación.

2.2.2 Principales fuentes de calor dentro de la mina

Considerando que las labores mineras subterráneas pueden alcanzar cientos o hasta miles de metros de profundidad, una mina subterránea resulta ser un ambiente idóneo para la extracción de energía geotérmica (Raymond & Gosselin, 2007). En este sentido, se podría considerar una mina como un gigantesco reservorio de calor, no solo debido al calor almacenado y transmitido a través de las paredes de las excavaciones, sino también al agua que pueda encontrarse en ellas (Touche et al., 2011). De este modo, teniendo en cuenta que el agua posee, en general, una mayor capacidad de almacenamiento térmico que la roca (*Thermal Properties*, 2011), las operaciones de drenaje pueden tener un papel preponderante en la extracción de calor residual dentro de la mina (Samusya, Oksen & Radiuk, 2013).

De igual forma, la utilización de intercambiadores de calor podría generar un valor agregado a elementos que son considerados desechos mineros o que simplemente no poseen un uso alternativo. Concretamente, para aprovechar la energía de las reacciones exotérmicas en botaderos de minas, debidas a la oxidación de minerales como la pirita (Banks, 2004). Esto podría resultar en una reducción de los costos operacionales dentro de la mina, al igual que el aprovechamiento del calor almacenado en el subsuelo. Asimismo, generalmente el caudal de aire que sale de una mina subterránea presenta una temperatura mayor a su caudal de entrada (Sbarba, 2012), por lo que su aprovechamiento también puede ser de utilidad.

2.2.3 Aplicaciones de la energía geotérmica de muy baja entalpía en minería

Si bien los precedentes de aplicaciones de esta tecnología en minas activas en el mundo son pocos, existen casos que denotan que la energía geotérmica de muy baja entalpía puede incluso dar viabilidad a un proyecto cuando este se presenta en condiciones remotas.

El aprovechamiento geotérmico en la mina Henderson (Jensen, 1983), productora de molibdeno de Freeport-McMoRan desde 1976, demuestra que, en aquellos proyectos ubicados en zonas de baja temperatura ambiente, en las que la temperatura del aire de entrada al sistema de ventilación de la mina puede producir el congelamiento de las instalaciones, y en que el acceso a los combustibles convencionales resulta muy costoso, la utilización del calor del subsuelo puede definir la viabilidad del proyecto en cuestión. Concretamente, Jensen describe que la temperatura del agua de drenaje dentro de la mina llega a una temperatura hasta 49°C más alta que la del aire de entrada a la mina durante el invierno. De esta forma, extrayendo energía del agua a un ritmo de 6 MW, se incrementa la temperatura de la ventilación de la mina en 9,4°C, logrando así evitar el congelamiento de las instalaciones durante el invierno.

De igual forma, como se comprueba en Bátaapáti, región de Hungría que presenta muy bajas temperaturas, la utilización del calor del subsuelo puede prevenir incluso el congelamiento de las rampas por las que circulan los equipos mineros (Toth, 2011), resultando así en una gran mejora de las condiciones de trabajo y de seguridad para operarios y equipos en zonas de temperaturas bajo cero. En concreto, el tramo inicial de 300 metros de extensión del túnel de acceso a la mina causaba serios problemas operativos debido a que este se congelaba durante el invierno y que los requerimientos de energía para evitar este problema alcanzaban los 155,8kW. Sin embargo, al buscar una solución a este problema, se descubre que la temperatura de la roca supera a la del aire entre 17°C y 18°C y que la temperatura del agua de drenaje en la mina presenta una temperatura estable de 15°C durante todo el año. De esta forma, se calcula que la energía extraíble de la roca en toda la extensión del túnel (357 kW) sumada a la energía extraíble del agua de drenaje (242 kW) basta para dar solución a esta problemática.

La energía geotérmica de muy baja entalpía también resulta ser de utilidad en minas subterráneas ubicadas en zonas cálidas que presentan altas temperaturas en la ventilación, puesto que ésta permite disminuir la temperatura en estos casos, contribuyendo así con el clima en las labores que presentan una temperatura inadecuada para el trabajo por parte del personal (Patsa, Zyl, & Zarrouk, 2015). Además, se genera a menores costos que haciendo uso de combustibles convencionales y sin producir emisiones de gases tóxicos dentro de la mina, lo que conlleva en una disminución de los requerimientos totales de ventilación.

El calor extraído de una mina activa, ya sea de la roca, del agua de drenaje u otro medio, puede ser de interés para calefaccionar las instalaciones administrativas de la empresa minera situada en la superficie sobre la misma, contribuyendo de esta forma a reducir los gastos de calefacción y las emisiones que debido a ella se producen (Touche et al., 2011).

El último uso identificado de la GMBE en minas activas, que puede ser de gran utilidad en países en los que el precio de la electricidad es elevado, es el calentamiento del agua para uso sanitario dentro de la mina. La mina Blagodatna, de la empresa DTEK Pavlogradugol, situada en Ucrania, utiliza los 200 m³ de agua a 17°C que drena por hora durante todo el año para calentar el agua de uso sanitario, obteniendo 266 kW de los 798 kW requeridos en este proceso, ahorrando así un tercio del capital requerido y pagando la inversión de la bomba de calor en tan solo 3,2 años (Samusya, Oksen & Radiuk, 2013).

Otros ejemplos relevantes de aprovechamiento de energía geotérmica se encuentran en minas inactivas, hay más de 20 instalaciones en funcionamiento en todo el mundo, donde las infraestructuras mineras subterráneas abandonadas inundadas contemplan en su plan de cierre su

reutilización como grandes almacenes de energía subterránea, proporcionando una alternativa viable y sustentable que permite convertir un pasivo minero en un activo (Díaz-Noriega et al., 2020).

2.3 Determinación de la conductividad térmica de rocas

Como se ha mencionado, caracterizar las propiedades térmicas de las rocas es fundamental en un proyecto de diseño y construcción de sistemas de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía (Saito et al., 2014).

La conductividad térmica es la conductividad térmica se presenta como el factor más relevante en un proyecto de esta índole (Nope & de Santiago, 2014).

Existen diversos mecanismos para determinar la conductividad térmica en rocas. Entre ellos, los dos sub-grupos más relevantes son los métodos teóricos y los métodos experimentales (Abuel-naga, 2005; Yan et al., 2019; Progelhof et al., 1976).

A su vez, los métodos experimentales pueden clasificarse como métodos in-situ y métodos de laboratorio. Del mismo modo, los métodos de laboratorio se clasifican en métodos de régimen estacionario y métodos de régimen transitorio (figura 2).

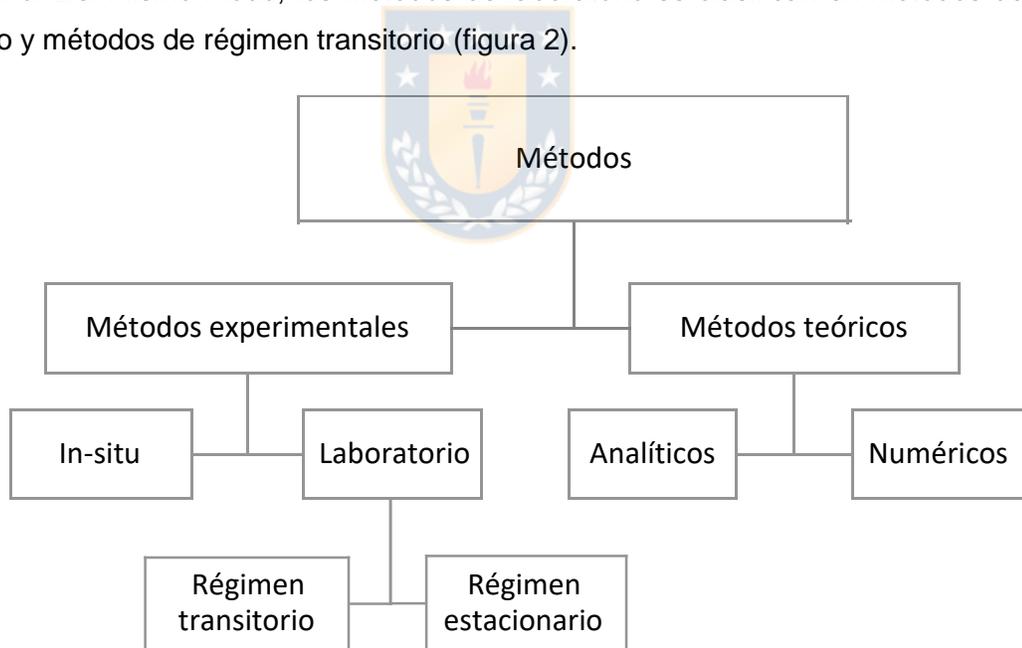


Figura 2: Esquema de clasificación de los métodos de determinación de conductividad térmica.

Las diferencias entre características de cada sub-grupo mencionado se presentan en los apartados a continuación.

2.3.1 Métodos teóricos

Los métodos teóricos se dividen en métodos analíticos y métodos numéricos (Farouki, 1981; Progelhof et al., 1976). Estos métodos consideran los mecanismos de transferencia de calor dentro

el terreno, así como su interacción con el agua que contiene. Además, estos métodos consideran los mecanismos de transferencia de calor entre terreno y el medio ambiente (Wullschleger et al., 1991).

Este tipo de métodos puede adaptarse a diferentes ubicaciones, tipologías de terreno y condiciones ambientales (Naranjo-Mendoza et al., 2018).

2.3.1.1 Métodos analíticos

Los métodos analíticos se basan en fórmulas definidas, ordenadas y finitas, de modo que, al aplicarse a un problema en particular, aplicando parámetros relacionados al área de aplicación, la determinación de la conductividad térmica del material siempre pueda ser definida.

Por ejemplo, el modelo analíticos de De Vries (1963) idealiza un sistema de fase múltiple y establece fórmulas determinísticas mediante análisis físicos y matemáticos para un volumen elemental representativo (Yan et al., 2019). En base a este modelo, se puede obtener un valor aproximado de la conductividad térmica de un material.

Cabe destacar que el establecimiento de modelos teóricos para la determinación de la conductividad del terreno es un desafío, debido a que en ellos coexisten y se relacionan múltiples factores. La variabilidad de la composición mineralógica, de la forma y el tamaño de las partículas que lo componen, de las fracciones volumétricas en cada fase, de su densidad aparente, de su porosidad, de su contenido de humedad, de materia orgánica y las variaciones de temperatura dentro del terreno, dificultan el establecimiento de un modelo teórico que se asemeje a las condiciones reales (De Vries & Peck, 1958; He et al., 2017; Lu et al., 2014).

Según Johansen (1975), las investigaciones teóricas mostraron que se puede esperar que los métodos puramente analíticos solo funcionen para materiales saturados en los que las conductividades de los componentes del terreno difieren poco entre sí.

Para materiales parcialmente saturados, la presencia de aire con baja conductividad térmica da como resultado una alta sensibilidad a las diferencias en la microestructura dentro del sistema. Dado que estas propiedades son difíciles de incorporar en un modelo matemático para la determinación de la conductividad térmica, en estos casos se debe recurrir siempre a un enfoque experimental.

2.3.1.2 Métodos numéricos

Los métodos numéricos se utilizan para resolver operaciones matemáticas complejas mediante algoritmos menos complejos, mediante el uso de un ordenador. Estos métodos

proporcionan una herramienta para describir procesos físicos y predecir su comportamiento en condiciones variadas.

Actualmente, se están desarrollando, probando y utilizando cada vez más herramientas de simulación numérica que permiten obtener resultados con garantías de predicción en problemas complejos y utilizar datos auxiliares (Rafique, 2015).

A una simulación numérica se antepone siempre un modelo conceptual que busca replicar las condiciones del problema. Así, para resolver cada problema, se deben establecer una hipótesis de simplificación que describa la física del sistema, las características geométricas del cuerpo en el que tiene lugar la transferencia de calor, las propiedades físicas del material que constituye el cuerpo, la distribución inicial de temperaturas en el cuerpo y las condiciones de contorno que describen las interacciones del cuerpo con el medio externo.

Una de las herramientas más utilizadas en el ámbito de la simulación numérica es el software COMSOL Multiphysics, basado en el método de los elementos finitos (MEF), que resuelve de manera iterativa aproximada las ecuaciones diferenciales de gobierno de un sistema continuo, reduciéndolo a un sistema discreto.

Este método resulta ser una alternativa eficiente para resolver modelos complejos de transferencia de calor y se presenta como una herramienta útil para estimar las propiedades térmicas de un material, minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo costos y tiempos de desarrollo de los experimentos (Hernández-Calderón et al., 2015).

2.3.2 Métodos experimentales

Los métodos experimentales se dividen en métodos de laboratorio, que se realizan mediante el uso de muestras de tamaño reducido, y métodos in-situ, que se realizan en terreno, mediante el uso de pozos o zanjas poco profundas (Jorand et al., 2013).

2.3.2.1 Métodos de laboratorio

Los métodos a escala de laboratorio se subdividen, a su vez, en dos categorías, los métodos de régimen estacionario, que proporcionan resultados más precisos a pesar de requerir largos períodos de medición, y los métodos en régimen transitorio, que destacan por su rapidez, aunque ofrecen una precisión menor.

Las principales ventajas de este tipo de métodos son su bajo costo de realización, su rapidez y la posibilidad de controlar las condiciones de contorno del medio en el que se realiza la transferencia de calor (Barba, 2018).

En la Tabla 3, se muestra una recopilación bibliográfica realizada de los diversos métodos de laboratorio para la determinación de conductividad térmica en rocas

Tabla 3: Métodos de determinación de conductividad térmica en rocas.

Régimen estacionario		Régimen transitorio	
Nombre del método	Referencia	Nombre del método	Referencia
Barra dividida	(Blackwell & Spafford, 1982)	Barra dividida transitoria	(Joffé, 1956)
Barra dividida electrónica portátil	(Antriasian, 2010)	Fuente plana transitoria	(S. E. Gustafsson, 1991)
Medidor de flujo de calor	(ASTM C 518-15, 2015)	Flujo de calor longitudinal comparativo	(ASTM E1225-04, 2004)
Placa caliente Guardada	(ASTM C 177-19, 2019)	Calorímetro de punto nulo	(ASTM E 598-15, 2015)
		Escaneo óptico	(Y. Popov et al., 2016)
		Fuente plana transitoria modificada	(ASTM D 7984-16, 2016)

En base a estos métodos, diversos laboratorios en el mundo desarrollan sus propios aparatos para utilizar este método y proporcionar la trazabilidad directa de la unidad de conductividad térmica a la industria (Terzić et al., 2016).

Cabe destacar que, entre éstos, el método de placa caliente guardada (GHP) es altamente utilizado para medir la conductividad térmica de materiales sólidos con una conductividad térmica entre 0,01 W/mK y 15 W/Mk, debido a su relativa sencillez (ASTM C 177-19, 2019).

Para este método se pueden diferenciar dos versiones principales, la de doble cara (2S-GHP), que funciona mediante el uso de dos muestras idénticas, y la de una sola cara (1S-GHP) que utiliza solo una muestra.

Además, existen diferentes versiones del método para medir la conductividad térmica de muestras rocosas diseñadas por diversos autores en base a la metodología de GHP original. Algunos de estos métodos se exponen en orden cronológico a continuación:

Pontigo (2016) realiza un ensayo basado en el método GHP, aplicado a muestras de areniscas con características petrográficas variables.

Terzić et al. (2016) desarrollan una configuración experimental según el principio del método 1S-GHP para mediciones de conductividad térmica de materiales sólidos cuya conductividad térmica se encuentra en el rango aproximado entre 0,1 y 2 W/mK, como cerámicas, polímeros y gomas, entre otros.

Blázquez et al. (2017) diseñan un aparato de medición de conductividad térmica tanto para rocas como para suelos, basado en el principio 1S-GHP y utilizando equipamiento habitual de laboratorio.

Del mismo modo, diversos autores se basan en las metodologías expuestas anteriormente (tabla 3) para conformar sus propias metodologías experimentales para la determinación de la conductividad térmica en rocas. Algunos de los métodos se exponen en orden cronológico a continuación:

Kukkonen & Lindberg (1998) miden en la conductividad térmica de las rocas utilizando el método de barra dividida en estado estacionario.

Ramstad & Beer (2008) diseñan equipos para medir la difusividad térmica de las muestras de roca. En este caso, la conductividad térmica se calcula como un producto de la densidad, la capacidad calorífica específica y la difusividad térmica.

Lira-Cortés et al. (2008) implementan un sistema de medición de conductividad térmica para materiales conductores sólidos utilizando un material de referencia.

Jorand et al. (2013) utilizan el método TCS (escáner de conductividad térmica óptica) basado en el escaneo de conductividad térmica sin contacto de un plano o superficie cilíndrica. Este instrumento utiliza una fuente de calor enfocada, móvil y en funcionamiento continuo, junto con dos sensores de temperatura infrarrojos a pequeñas distancias detrás y delante de la fuente, para medir la conductividad térmica a lo largo de las líneas de exploración.

Pasquale et al. (2015) diseñan un aparato que mide la diferencia de temperatura entre dos lados de una muestra, uno de los cuales se está enfriando mediante un baño termostático, técnica basada en el método de la barra dividida, al igual que el trabajo de Bording et al. (2016).

Zhao et al. (2016), utilizando el método de fuente de plano transitorio, determinan las conductividades térmicas de muestras en condiciones secas y saturadas de agua. Sumado a esto, investigan el efecto de la saturación del agua sobre la conductividad térmica del material.

Popov et al. (2019) desarrolla un conjunto de métodos e instrumentos avanzados para determinar propiedades térmicas en muestras de roca y mejorar la calidad de los datos experimentales sobre las propiedades térmicas.

Nian et al. (2020) presentan una nueva estimación secuencial para las propiedades térmicas del subsuelo mediante el uso de datos de prueba de respuesta térmica distribuida (DTRT).

Jia et al. (2020) generan un modelo de conductividad térmica basado en el método de resistencia térmica en serie paralelo para los suelos rocosos con diferentes componentes y contenidos de agua.

2.3.2.2 Métodos in-situ

En proyectos de geotermia de muy baja entalpía de gran envergadura, el método más utilizado es la prueba de respuesta térmica (TRT), que permite obtener in-situ la conductividad térmica del terreno.

La mayor ventaja de este método es que permite integrar las propiedades térmicas del suelo a lo largo de toda la profundidad de un sistema de aprovechamiento geotérmico, incluidas las aguas subterráneas y el material de relleno, obteniéndose una conductividad térmica "efectiva" que incluye los efectos de los distintos materiales presentes en el sistema.

El método TRT, propuesto por primera vez por Morgensen (1983) y se basa en un modelo de fuente de calor lineal (LHS) (Carslaw & Jaeger, 1962), consiste en hacer circular un fluido caliente a través de una tubería dispuesta en el terreno. Las temperaturas del fluido se monitorean a la entrada y a la salida de la tubería son monitoreadas.

Después de un cierto tiempo, la variación de la temperatura entre la entrada y la salida se estabiliza, indicando que el sistema está recibiendo una tasa de inyección (o extracción) de calor constante. De las mediciones registradas, se evalúan la resistencia térmica del sondaje y la conductividad térmica del suelo circundante.

El primer TRT fue desarrollado paralelamente entre 1995 y 1996 en la Luleå University of Technology en Suecia, y la Oklahoma State University en EE.UU. (Gustafsson, 2006). Desde entonces, este método ha sido mejorado en más de una ocasión y su utilización se ha expandido a diversos países, entre los que destacan Alemania, Turquía, Japón y China (Gehlin, 2002).

A pesar de constituir una solución adecuada para determinar la conductividad térmica del terreno, esta metodología presenta un alto costo relativo, especialmente para empresas mineras

pequeñas, donde un aumento importante del presupuesto global puede determinar la viabilidad de un proyecto (Blázquez et al., 2016).

2.4 Fundamentos de transferencia de calor

En este capítulo, se describen los parámetros y leyes que rigen los mecanismos de transferencia de calor en medio sólido. Se enfatiza de entre estos mecanismos la conducción de calor en sólidos, puesto que este es el mecanismo principal que sienta la base teórica de este trabajo del experimento desarrollado.

2.4.1 Propiedades térmicas

Las propiedades termo-físicas son de interés fundamental si lo que se busca es determinar el potencial geotérmico de un terreno o de una roca en específico. En concreto, la comparación entre las magnitudes de estos parámetros es la que permiten identificar qué rocas poseen mayor capacidad para transmitir y almacenar el calor.

Los apartados dispuestos a continuación enuncian las propiedades térmicas de interés en el ámbito de la transferencia de calor.

La conductividad térmica (k) es una propiedad física que mide la habilidad intrínseca de un material para transferir o conducir el calor. Su magnitud define cuán rápido fluye el calor a través de un material y, de este modo, si éste es un buen conductor de calor.

El valor de la conductividad térmica de un material depende de sus propiedades atómicas o internas (Holman, 1998). Concretamente, cuanto más rápido se movilizan las partículas de un material, más rápidamente éstas transportan energía.

La conducción de calor se rige por la Ley de Fourier (Holman, 1998). Esta ley establece que, si en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, el flujo de calor se transmite desde el punto de mayor temperatura hasta el de menor temperatura (Lienhard IV & Lienhard V, 2017).

El flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura y a la superficie perpendicular al flujo por la cual se transfiere y la conductividad térmica del cuerpo representa la constante de proporcionalidad. Esta relación matemática queda expuesta según la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

representa el flujo de calor (W/m^2)

— representa el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor (K/m)

En la expresión anterior, se considera un signo negativo con el fin de satisfacer el segundo principio de la termodinámica, es decir, que calor debe fluir hacia las temperaturas decrecientes. Esto se ve reflejado en que el flujo de calor va desde las zonas de mayor temperatura a aquellas de menor temperatura (Holman, 1998). Además, los flujos de calor son positivos en el sentido positivo del eje de coordenadas. Para esto, la temperatura debe decrecer en el sentido positivo de la coordenada, es decir, $\frac{dT}{dx} < 0$. Por lo tanto, el signo menos sirve para cumplir la convención.

Los valores de la conductividad térmica varían en un amplio rango dependiendo del tipo de material. En general, a los materiales que presentan un valor elevado para la conductividad térmica se les denomina conductores del calor. Contrariamente, a los materiales que presentan una conductividad térmica baja, se les denomina aislantes térmicos.

En este sentido, las conductividades térmicas los materiales gaseosos suelen ser las más bajas y la de los metales puros y los cristales suelen ser las más altas. Concretamente, la variación del valor de la conductividad entre estos dos tipos de materiales puede llegar a presentarse en un orden de magnitud de 10^4 .

Con el fin de demostrar el rango que puede presentar el valor de la conductividad térmica, en la tabla 4 se muestran los valores de la conductividad térmica a temperatura ambiente de algunos materiales comunes.

Tabla 4: Valores de conductividad térmica de materiales comunes a temperatura ambiente (Cengel, 2006).

Material	k ($W/m \cdot K$)
Cobre	401
Aluminio	237
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Aire (g)	0.026

La capacidad térmica volumétrica (ρc_p) de un material se define como la capacidad que tiene un volumen determinado de una sustancia para almacenar calor cuando se produce una

variación en su temperatura, sin experimentar cambio de fase. Este parámetro puede obtenerse multiplicando el calor específico de un material () por su densidad ().

La difusividad térmica (α) es el parámetro que define la velocidad de cambio y flujo de temperatura en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Este parámetro depende de la conductividad térmica y de la capacidad térmica volumétrica del material.

Esta relación matemática queda expuesta según la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

Donde:

α representa la difusividad térmica (m^2/s)

k representa la conductividad térmica del material (W/mK)

ρ representa la densidad del material (kg/m^3)

c_p representa el calor específico del material (J/kgK)

2.4.2 Modelos de fuentes de calor

Cuando se trata fuentes de calor, es necesario conocer la intensidad volumétrica de liberación de calor, que se expresa generalmente en W/m^3 (Ingersoll et al., 1948).

En función de las características geométricas de las fuentes de calor, éstas se pueden clasificar en 4 tipos: puntuales, lineales, superficiales y volumétricas.

Se considera una fuente de calor puntual cuando sus dimensiones en todas las direcciones son infinitamente pequeñas, es decir, la fuente resulta pequeña en comparación con el cuerpo al cual calienta.

Una fuente lineal de calor puede considerarse como una serie continua de fuentes puntuales de calor a lo largo de una línea recta infinita.

Las fuentes volumétricas de calor se consideran cuando sus 3 dimensiones en las direcciones de un sistema cartesiano de coordenadas son lo suficientemente grandes respecto al medio considerado al producir calor. Como simplificación común, cuando se tiene una fuente volumétrica esférica de dimensiones muy reducidas puede aproximarse a una fuente puntual.

Se habla de fuentes de calor superficiales cuando dos de las tres dimensiones espaciales que definen la fuente de calor son mucho mayores que la tercera.

2.4.3 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso termo-físico que describe el tránsito de energía de un cuerpo a otro o entre dos partes de un mismo cuerpo. En condiciones naturales, el calor siempre fluye desde el punto de mayor temperatura al punto de menor temperatura.

En este sentido, el cuerpo que entrega calor se denomina “fuente” o foco caliente y aquel que la recibe se denomina “receptor” o foco frío (Kern, 1999).

Los mecanismos de transferencia de calor pueden ser clasificados en conducción, convección y radiación. Estos mecanismos se detallan en los subcapítulos a continuación.

2.4.3.1 Transferencia de calor por convección

Este mecanismo de transferencia de calor se puede dar entre una superficie sólida y un fluido adyacente que esté en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos (Cengel, 2006). Se está en presencia de convección cuando el transporte de calor se debe a que volúmenes de líquido o de gas se mueven, de regiones que están a una temperatura determinada a otras regiones que poseen una temperatura diferente. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se describe mediante ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 3).

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

(3)

Donde:

q representa el flujo de calor (W/m^2)

h representa el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2K)

A representa el área en donde fluye el calor (m^2)

T_s representa la temperatura de la superficie del sólido (K)

T_∞ representa la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie (K)

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba, o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural si el movimiento es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido.

Este mecanismo de transferencia de calor puede ser relevante en algunos aspectos experimentales de este trabajo, sin embargo, no se aborda en más detalle puesto que excede el alcance y los objetivos planteados.

2.4.3.2 Transferencia de calor por radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de los mecanismos de conducción y convección, la transferencia de calor radiante no requiere la intervención de un medio, y el calor puede ser transmitido por radiación a través del vacío absoluto (Kern, 1999).

Este mecanismo de transferencia de calor no se aborda más en detalle puesto que está fuera del alcance y objetivos del trabajo. A pesar de ello, cabe mencionar que una de las alternativas de monitorización de los experimentos realizados que fue puesta en práctica sin resultados positivos, se basó en la obtención de temperaturas en las muestras de materiales detríticos ensayados mediante la medición directa en la superficie de la muestra de su radiación en la longitud de onda infrarrojo cercano.

2.4.3.3 Transferencia de calor por conducción

El principal mecanismo de interés en este trabajo es el de transferencia de calor por conducción.

La transferencia de calor por conducción se da cuando hay contacto directo entre las partículas de los cuerpos involucrados que están a distintas temperaturas. Este proceso ocurre a escala atómica y se da por el choque entre las moléculas. De esta forma, las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas.

La conducción va generalmente acompañada de variaciones de temperatura en el tiempo y en el espacio. Si se unen todos los puntos de un cuerpo tridimensional que estén a la misma temperatura se obtiene una superficie de igual temperatura denominada isoterma. La isoterma de un cuerpo es el lugar geométrico conformado por los puntos que tienen igual temperatura.

2.4.4 Ecuación fundamental de la conducción de calor

La ecuación fundamental de la transferencia de calor por conducción describe la distribución espacial y temporal de temperaturas en un medio continuo, mediante la ley de Fourier (Ecuación 1). Así, la resolución de la ecuación permite determinar la temperatura de cualquier punto del medio para cualquier instante de tiempo (Cengel, 2006).

Para la determinación de la ecuación, en este caso se asume un intervalo de tiempo diferencial y un cuerpo de volumen diferencial en un medio continuo de dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Se asume, además, que el cuerpo está compuesto por un material homogéneo. El resultado de esta ecuación diferencial, para unas condiciones de contorno determinadas, proporciona la distribución de temperaturas en el medio en función del tiempo.

Teniendo en cuenta el primer principio de la termodinámica para un sólido en reposo, el balance de energías es:

$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_x + \dot{Q}_y - \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_z + \dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{alm} \tag{4}$$

Donde:

\dot{Q}_x representa la energía que entra por conducción a través de la cara izquierda del cuerpo (J).

\dot{Q}_x representa la energía que sale con conducción a través de la cara derecha del cuerpo (J).

\dot{Q}_{gen} representa la energía que se genera o se disipa al interior del cuerpo (J).

\dot{Q}_{alm} representa la energía que se almacena en el cuerpo (J).

Estas cantidades de energía vienen dadas por:



$$\dot{Q}_x = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \tag{5}$$

$$\dot{Q}_{alm} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{6}$$

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{gen} \tag{7}$$

$$\dot{Q}_{alm} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{8}$$

Donde:

k representa la conductividad térmica del material (W/mK)

A representa un área (m²)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ — representa el gradiente de temperatura (K/m)

T representa la temperatura (K)

Δx representa un espesor (m)

\dot{q} representa la energía generada por unidad de volumen y por unidad de tiempo (W/m^3)

ρ representa la densidad del material (kg/m^3)

c_p representa el calor específico del material (J/kgK)

t representa el tiempo (s)

La combinación de las relaciones anteriores proporciona:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = \dot{q} \quad (9)$$

Considerando un medio en que existe un campo de temperatura $T(x, y, z, t)$, y la conductividad térmica del material k , la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos en las tres direcciones del sistema de coordenadas cartesianas, q_x, q_y, q_z . De este modo, se tiene:

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (10)$$

Donde:

q_x, q_y, q_z representa el calor que entra por conducción a través de la cara izquierda del cuerpo para los distintos ejes cartesianos (J)

$-q_x, -q_y, -q_z$ representa el calor que sale por conducción a través de la cara derecha del cuerpo para los distintos ejes cartesianos (J)

W representa la energía almacenada en el cuerpo (W)

Las cantidades de energía vienen dadas por:

$$W = \int_V \rho c_p T \, dV \quad (11)$$

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad (12)$$

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad (13)$$

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad (14)$$

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dV \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \cdot \dots \quad (16)$$

$$\dots = \dots \quad (17)$$

$$\dots = \dots \quad (18)$$

De este modo la ecuación general de la conducción de calor tridimensional en coordenadas cartesianas es:

$$\dots \quad (19)$$

Luego, se puede hacer una simplificación de esta ecuación considerando que la conductividad térmica es constante en todas las direcciones del sólido tridimensional, por tanto, si se tiene en cuenta esto, la ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \dots \quad (20)$$

Si además se asume que no hay generación o disipación de energía en el medio analizado, la expresión quedaría finalmente expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

Para la resolución de esta ecuación es necesario aplicar una serie de condiciones para la temperatura: una condición inicial relativa a la distribución temporal inicial de las temperaturas y dos condiciones de contorno relativas a su distribución espacial por cada dirección (Frederick & Courtin, 2006).

En lo que se refiere a las condiciones de contorno, son tres los tipos más habituales: de primera, de segunda y de tercera especie.

La Condición de primera especie o Condición de Dirichlet, se corresponde con el caso en que la temperatura de la superficie (T_s) es igual a la temperatura del medio que la rodea (T_∞).

$$T(x, y, z) = T_\infty \quad (22)$$

La Condición de segunda especie o Condición de Von Neumann, se corresponde con el caso en el que se establece un flujo de calor fijo a o desde la superficie, según sea el caso.

$$(, , ,) = - \cdot \cdot \cdot \quad \text{---} \quad (23)$$

La Condición de tercera especie se corresponde con el caso en que existe cierto intercambio de calor por convección entre la superficie del cuerpo y sus alrededores, siendo este intercambio proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie () y el medio que la rodea ().

$$(\dots) = h(- (\dots)) \quad (24)$$

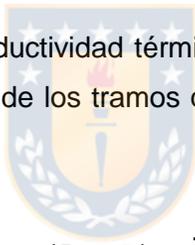
Donde, h es el coeficiente de convección.

2.4.5 Ley de Fourier para flujos de calor a través de paredes planas

Al igual que en el caso de un flujo de calor en paredes esféricas, el fenómeno de conducción de calor para un flujo de calor a través de paredes planas se puede materializar según la ley de Fourier.

Para este caso en concreto, basados en el método propuesto por Blázquez et al. (2017) se determina la conductividad térmica en testigos de roca.

Para la determinación de la conductividad térmica se utilizó esta aproximación, aplicado la ley de Fourier (ecuación 3) a cada uno de los tramos que componen el sistema, y obteniendo las siguientes ecuaciones:



$$1 = - 1 \cdot \frac{\Delta_1}{\cdot} \quad (25)$$

$$2 = - 2 \cdot \frac{\Delta_2}{\cdot} \quad (26)$$

$$3 = - 3 \cdot \frac{\Delta_3}{\cdot} \quad (27)$$

Donde:

- $1,2,3$ representa el flujo de calor en cada cilindro (W/m^2)
- $1,2,3$ representa el coeficiente de conductividad térmica de cada material (W/mK)
- $1,2,3$ representa el área transversal de cada cilindro donde fluye el calor (m^2)
- $\Delta_{1,2,3}$ representa la variación de temperatura considerando cada extremo del cilindro (K)
- $1,2,3$ representa el espesor de cada cilindro (m)

Para el cálculo de la conductividad térmica se miden las temperaturas T_2 , T_3 , T_4 hasta que se estabilizan. Se considera además que el flujo de calor es constante, por tanto, el mismo en cada una de las muestras, y que el radio de todas las muestras es el mismo, por tanto, su área transversal es la misma. Considerando lo anterior, se puede calcular la conductividad de la muestra (Lira-Cortés et al., 2008; Pei et al., 2013).

Igualando los flujos de calor Q_2 y Q_3 (Ecuaciones 26 y 27), se obtiene la siguiente ecuación:

$$= \frac{k_2 (T_2 - T_3)}{L_2} = \frac{k_3 (T_3 - T_4)}{L_3} \quad (28)$$

Donde:

k_2 representa el coeficiente de conductividad térmica de la muestra de roca (W/mK).

k_3 representa el coeficiente de conductividad térmica del cilindro de aluminio (W/mK).

T_2, T_3, T_4 representan las temperaturas en los distintos horizontes (K).

L_2 representa el espesor de la muestra de roca (m).

L_3 representa el espesor del cilindro de aluminio (m).



3 Determinación experimental de la conductividad térmica

A continuación, se describe el desarrollo del experimento desde su fase de diseño y planificación, en la que se define la metodología y los materiales utilizados y la adquisición de datos.

3.1 Introducción

En los cuerpos rígidos, como rocas, la transmisión de calor es principalmente conductiva. Así, por ejemplo, en la litósfera, la transmisión del calor es en su gran mayoría por conducción, con la excepción de aquellos sectores puntuales donde se registra el ascenso de fundidos magmáticos, puesto que estos transfieren el calor mediante procesos de convección hacia los niveles más superficiales.

En cuanto a las propiedades térmicas de las rocas, es importante tener en cuenta que existe una gran variabilidad para los tipos de rocas individuales. Esto se atribuye a la heterogeneidad, la diversidad en el contenido mineral y la textura de la roca, y el contenido fluido, entre otros.

Las propiedades térmicas en rocas están relacionadas con la composición mineral, la compactación (y en consecuencia la porosidad) y la anisotropía de la roca. Los otros factores importantes en la formación rocosa son las relaciones volumétricas entre las fases sólida, líquida y gaseosa y el contenido de humedad (Labus & Labus, 2018).

Las rocas sedimentarias silíceas como la arenisca la ensayada en este trabajo, tienen generalmente una conductividad alta en comparación con las rocas carbonatadas como resultado del contenido de cuarzo (*Thermal Properties*, 2009).

3.2 Diseño y planificación del experimento

Por medio de la información recopilada y planteada en el estado del arte del presente informe acerca de las técnicas existentes para la determinación de las propiedades térmicas en rocas, se determina que el modelo propuesto por Cristina Blásquez et al. (2019) será la base para desarrollar el experimento.

El modelo propuesto implica utilizar el calor desprendido por un artefacto de esterilización de insumos médicos para calentar una muestra de roca (), de conductividad térmica desconocida, dispuesta entre dos cilindros de conductividad térmica conocida ($1 \text{ } 2$), posicionados dentro de un tubo aislado térmicamente, con un extremo conectado a la fuente de calor y el otro expuesto a la temperatura ambiente. La fluctuación de la temperatura dentro del sistema se mide por medio de la utilización de 4 sensores térmicos dispuestos de forma transversal en los extremos de los

cilindros de conductividad conocida (1, 2, 3, 4). A continuación, se presenta de forma esquemática el sistema planteado (figura 3):

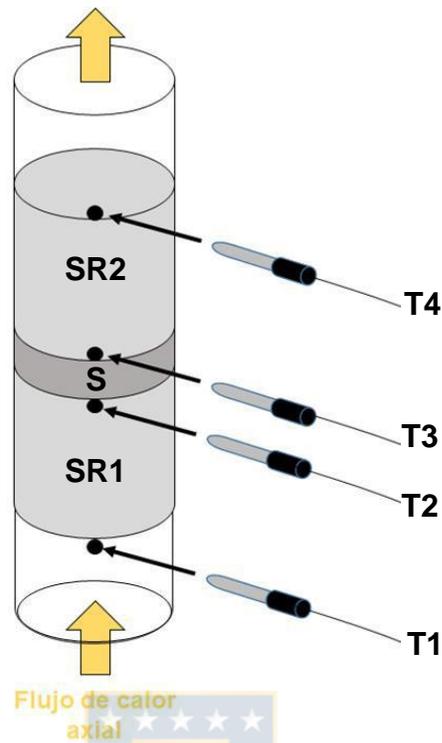


Figura 3: Diseño esquemático del experimento para testigos de roca.

3.3 Materiales utilizados

En este apartado se describen los materiales utilizados para el montaje del experimento, destacando sus características relevantes para este estudio (las especificaciones técnicas de los materiales se adjuntan en el Anexo 1). El costo total de los implementos utilizados es de 61.362 CLP (véase el presupuesto en el Anexo 2).

Muestra de testigo de roca

Para el desarrollo de la experiencia se utiliza un testigo de roca de 0,9 cm de espesor y 5 cm de diámetro. Se considera un espesor pequeño para acortar la duración de la experiencia y así aumentar la eficiencia del modelo propuesto (C. S. Blázquez et al., 2019).

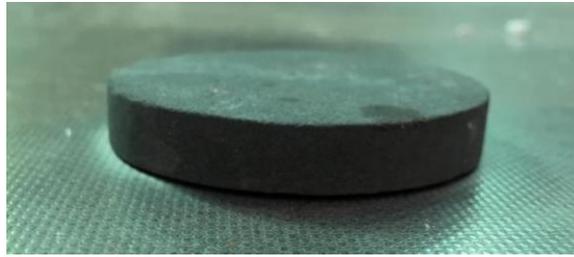


Figura 4: Muestra de estudio para el experimento en testigos de roca.

Fuente de calor (Pupinel)

Se utiliza como fuente de calor para el experimento un pupinel de esterilización de insumos médicos, con una temperatura máxima programable de 200°C.



Figura 5: Fuente de calor utilizada en el experimento para testigos de roca.

Cilindros de conductividad conocida

Se utilizan 2 cilindros de Duraluminio 2011, de 0,025 m de radio y 0,08 m de espesor, y una conductividad térmica de 152 (W/mK).



Figura 6: Cilindros de Duraluminio 2011.

Tubería de PVC

Con el fin de direccionar el flujo de calor liberado por la fuente de calor hacia el material de estudio, se emplea una tubería de PVC hidráulico de 5 cm de diámetro. Es relevante señalar que la dimensión de la tubería es seleccionada en función del diámetro de la muestra de estudio, para así evitar que se produzcan errores de medición causados por la presencia de aire dentro del sistema.



Figura 7: Tubería de PVC de 5 cm de diámetro interno.

Tubo de espuma de polietileno

Con el objeto de evitar pérdidas de calor de forma radial a lo largo del sistema, se utiliza como aislante térmico espuma de polietileno de conductividad térmica de $0,04 \text{ W/mK}$ para forrar la tubería de PVC por la que fluye el calor desprendido por el pupinel.



Figura 8: Tubo de espuma de polietileno (aislante térmico).

Placa programable Arduino

Se utiliza, para programar el código requerido para la toma de datos, una placa programable Arduino UNO. Esta placa funciona como un nexo entre los sensores dispuestos en el experimento y un ordenador, encargado de almacenar los datos para su posterior análisis.



Figura 9: Placa programable Arduino UNO.

Sensores de temperatura ds18b20

Se utilizan para la medición de temperatura del sistema 4 sensores de temperatura modelo ds18b20 dispuestos transversalmente a través del sistema como se indica previamente (figura 18). Los sensores utilizados son de tipo digital y tienen un rango de medición de -55°C a 125°C , con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.



Figura 10: Sensor digital ds18b20.

Unidad de almacenamiento y procesamiento de datos

Se requiere un ordenador para almacenar los datos medidos y que contenga el software Arduino. Dicho software es requerido para la programación de la placa. Además, el ordenador debe contar con un software de procesamiento numérico, como Python, R y Matlab. En este caso se opta por la utilización de Matlab.

3.4 Desarrollo del experimento

En los capítulos dispuestos a continuación, se detallan los procesos efectuados durante el desarrollo del experimento, desde la preparación de los materiales y la muestra de estudio, hasta el montaje de experimento y la calibración de los equipos utilizados para la medición.

3.4.1 Obtención de la muestra

La muestra utilizada es una arenisca fina verdosa proveniente de la formación Boca Lebu, tomada en el sector de Quilachanquín, cerca de la localidad de Ramadillas en la Comuna de Arauco, región del Bío-Bío.

3.4.2 Preparación de la muestra

Mediante el uso de una testiguera, se recupera de la roca traída de campo un testigo de 5 centímetros de diámetro (figura 11).



Figura 11: Recuperación de testigo de roca.

Posteriormente, mediante el uso de una sierra de banco (figura 12), el testigo de roca se divide en muestras del menor espesor posible con el fin de disminuir la fase de calentamiento y así aumentar la velocidad del procedimiento experimental (Blázquez et al., 2019), obteniendo así una muestra de 5 centímetros de diámetro y 1 centímetro de espesor.



Figura 12: Procedimiento de ajuste del espesor de la muestra.

A partir de la muestra, se busca una tubería de PVC que cuente con un diámetro interno que ajuste de la mejor forma posible a las dimensiones requeridas, para así minimizar la presencia de aire entre la muestra y la tubería. El PVC 50 se ajusta de buena forma a los testigos de 5 centímetros de diámetro (figura 13), por lo que se opta por esta medida como determinante para la dimensión de los otros elementos del experimento.



Figura 13: Selección del diámetro de PVC a utilizar en función del diámetro del testigo de roca.

3.4.3 Preparación de la fuente de calor

Con el fin de aprovechar de la mejor forma posible el calor generado por el pupinel, se opta por realizarle una perforación en la puerta, de modo de poder realizar una conexión directa para la salida de calor (figura 14).



Figura 14: Conexión adaptada a la fuente de calor.

3.4.4 Preparación de los cilindros de conductividad conocida

Con el fin de evitar errores de medición, es de gran relevancia que no quede aire dentro del sistema. Por este motivo, se ajusta el diámetro de los cilindros de duraluminio para que estos calcen lo más ajustadamente posible a la tubería interior de PVC (figura 15).



Figura 15: Adaptación de los cilindros de Duraluminio al diámetro del sistema.

Al igual que la presencia de aire entre los cilindros y la tubería podría afectar el valor de la conductividad térmica medida experimentalmente, la presencia de aire entre los cilindros de duraluminio y la muestra podría conllevar el mismo resultado. De este modo, es fundamental asegurar que todos los elementos posicionados dentro del sistema hagan contacto de la mejor forma posible. Para esto, se realiza un surco de las dimensiones exactas de los sensores de temperatura en cada uno de los cilindros (figura 16), logrando un mejor contacto entre estos y el testigo (figura 17).



Figura 16: Surco confeccionado en los cilindros de Duraluminio 2011 para el posicionamiento de los sensores dentro del sistema.



Figura 17: Posicionamiento del sensor para mejorar el contacto entre los componentes del sistema.

3.4.5 Ensamblaje de los componentes del sistema

Una vez que todos los componentes del experimento están listos para ser acoplados, se perforan los 4 orificios en la tubería de PVC (figura 18).



Figura 18: Confección de los orificios en la tubería de PVC para el posicionamiento de los sensores.

Finalmente, se recubre la tubería con el aislante térmico, se introduce la muestra de estudio posicionada entre los dos cilindros de duraluminio al sistema, se anexa la tubería a la fuente de calor y se posicionan los sensores de temperatura según lo planeado con anterioridad (figura 19).



Figura 19: Disposición final de los componentes del experimento para testigos de roca.

3.4.6 Conexión y programación del sistema de monitoreo

Antes de realizar las conexiones en el sistema de monitoreo, se debe descargar la aplicación Arduino y programar la placa. Para esto, se descarga del sitio web oficial de Arduino (<https://www.arduino.cc/>) la aplicación Arduino, de uso libre y gratuita. Una vez instalada la aplicación, se compila un código para gestionar la medición de temperatura con los 4 sensores digitales ds18b20 siguiendo las instrucciones disponibles en el sitio web (véase el Anexo 3).

Una vez programada la placa, se debe corroborar el correcto funcionamiento de los sensores seleccionados para llevar a cabo la medición de temperatura. Cabe destacar que los sensores seleccionados (sensores digitales ds18b20) no requieren de una calibración previa, puesto que son del tipo termistor.

La corroboración de los sensores se hace realizando mediciones dentro de un recipiente con agua destilada a 20°C y a 80°C, utilizando un termómetro de bulbo de mercurio. Es importante realizar una revisión o inspección visual para comprobar que el sensor y los cables se encuentren en buenas condiciones, asegurándose que los sensores no estén torcidos o dañados.

Finalizando este proceso, se procede a realizar la conexión de los sensores a la placa Arduino mediante el uso de un protoboard como intermediario. Se instala, además, un módulo de reloj, que permite controlar los tiempos de medición, y una resistencia “pull-up” (4,7 kΩ) por cada sensor conectado al protoboard (figura 20). El Arduino, a su vez, es conectado al ordenador portátil.

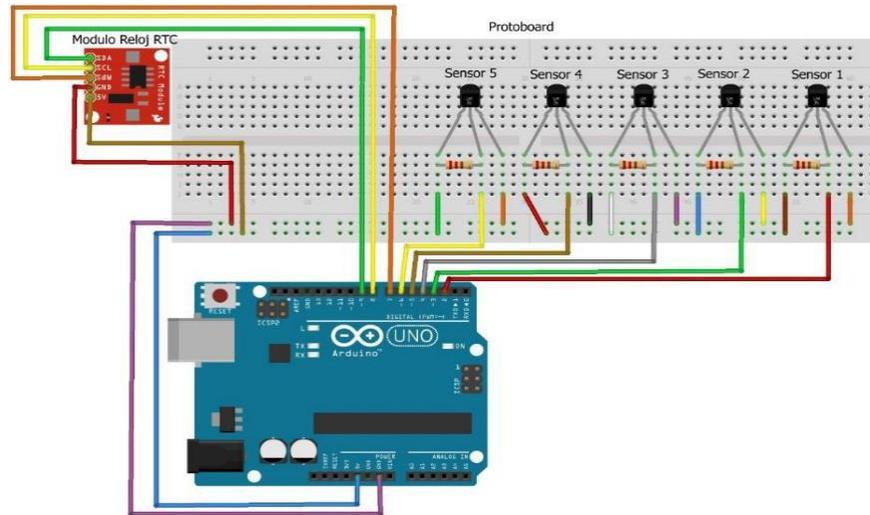


Figura 20: Esquema de conexión de los sensores a la placa Arduino.

En el ordenador con el programa Arduino instalado, se requieren 2 librerías para poder establecer la comunicación con un sensor ds18b20 y la placa arduino. La primera es la librería “OneWire” y la segunda es la librería “DallasTemperature”.

Luego, se debe configurar el IDE de Arduino, seleccionando la placa a utilizar (en este caso, una placa Arduino UNO). Una vez que se tiene la placa seleccionada, se busca y selecciona el puerto COM que está conectado al Arduino. Finalmente se debe configurar el IDE, es decir, seleccionar el tipo de programador que utiliza Arduino.

Mediante el uso del software Matlab, se realiza un código para que almacene los valores de temperatura medidos en tiempo real medidos por los sensores gestionados con el Arduino (Código en el Anexo 4). Los datos se almacenan en intervalos de 7 segundos.

3.4.7 Toma de datos

El resultado final de la toma de datos en cada una de las 2 experiencias realizadas, son 4 series temporales de mediciones de temperatura, una por cada sensor.

Los gráficos de temperatura v/s tiempo por cada sensor presente en el sistema permiten identificar 2 fases.

La fase de calentamiento (etapa 1) inicia en el segundo 0, es decir, en el momento en que comienza el paso de corriente al pupinel y, por ende, éste comienza a generar un flujo de calor dentro del sistema.

La primera etapa finaliza cuando la temperatura en el tiempo se mantiene constante y la curva presenta una pendiente prácticamente igual a 0. En este momento, se da comienzo a la fase estable (etapa 2).

La duración de la fase estable se prolonga hasta que se desconecta la fuente de calor.

Cabe destacar que las condiciones en las que se realiza la toma de datos para las experiencias no son ideales, debido a que el experimento se dispone en un lugar en el que no se tiene un control exacto de la temperatura ambiente.

Es importante mencionar que la curva T1 corresponde a los valores de temperatura medidos por el sensor 1 (sensor más cercano a la fuente de calor). Del mismo modo la curva T2 corresponde a los valores de temperatura medidos por el sensor 2, y así hasta llegar hasta la curva T4, que corresponde a los valores medidos por el sensor 4 (sensor expuesto al ambiente).

A continuación, se presentan los gráficos de temperaturas frente al tiempo obtenidos en la experiencia 1 (figuras 21) y experiencia 2 (figuras 22), que muestran las dos etapas descritas.



Figura 21: Gráfico obtenido de la experiencia 1 (°C v/s segundos).

Como se observa en la figura 21, la etapa de calentamiento de la primera experiencia realizada termina al cabo de 22.000 segundos de comenzado el flujo de calor a través del sistema.

A partir de este momento, la temperatura dentro del sistema se estabiliza y mantiene durante 1.996 segundos, hasta que se corta el suministro de energía de la fuente de calor.

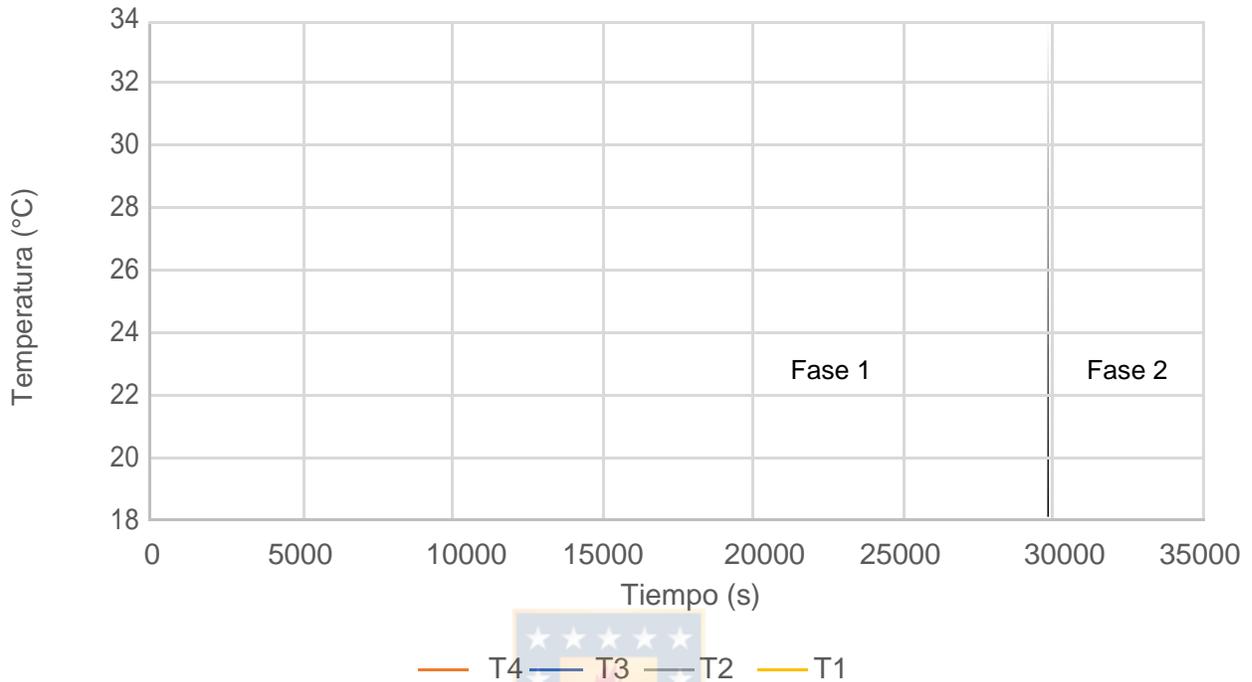


Figura 22: Gráfico obtenido de la experiencia 2 ($^{\circ}\text{C}$ v/s segundos).

Del mismo modo, la fase de calentamiento de la segunda experiencia tiene una duración de 30.000 segundos y su fase estable tiene una duración de 2.271 segundos (figura 22).

Finalmente, los valores de temperatura promedio medidos por de cada sensor durante la fase estable de ambas experiencias realizadas (Tabla 5) son los que finalmente se utilizan para calcular la conductividad térmica de la muestra.

Tabla 5: Temperatura promedio durante la fase estable para ambas experiencias.

Sensor	Experiencia 1	Experiencia 2
Temperatura (K)		
T1	304,15	304,01
T2	303,13	302,92
T3	298,95	298,71
T4	298,21	298,02

4 Análisis y discusión de resultados

En los apartados dispuestos a continuación, se exponen los resultados obtenidos de forma experimental para las dos pruebas y las simulaciones realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics.

4.1 Conductividad térmica experimental

En base a la ecuación 2 y las mediciones de temperatura en la fase estable, se calcula el valor experimental de conductividad térmica del testigo de roca de la experiencia 1.

$$k_1 = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$k_1 = \frac{0,009 \cdot (298,95 - 298,21)}{0,08 \cdot (302,13 - 298,95)}$$

$$k_1 = 3,03$$

Del mismo modo, se realiza el cálculo para la experiencia 2:

$$k_2 = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

$$k_2 = \frac{0,009 \cdot (298,71 - 298,02)}{0,08 \cdot (302,12 - 298,71)}$$

$$k_2 = 2,8$$

Los valores de conductividad térmica obtenidos en las experiencias 1 y 2 se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados de las experiencias 1 y 2 para conductividad térmica k .

Experiencia	k
1	3,03
2	2,8
Promedio	2,92

La conductividad térmica en rocas suele estar en el rango de 0,4 W/mK a 7,0 W/mK (Cermak & Rybach, 1982). Así, dependiendo del tipo de roca, su conductividad térmica variará dentro de este intervalo.

Los valores bajos, son característicos de rocas sedimentarias secas no consolidadas, como gravas y arenas.

Los valores de conductividad térmica intermedios son, en la mayoría de los casos, de rocas sedimentarias y metamórficas.

Por último, los valores muy altos son típicos de las rocas ígneas félsicas.

Teniendo en cuenta que la muestra de estudio se extrajo de una roca sedimentaria (arenisca fina), se realiza una revisión bibliográfica específica para determinar el intervalo en el que puede presentarse la conductividad térmica de este tipo de roca.

Blackwell & Steele (1989) proporcionan valores de conductividad térmica para areniscas en el rango de 2,5 W/mK a 4,2 W/mK.

Cermak & Rybach (1982) documentan valores en el rango de 0,9 a 6,5 (W/mK).

Mielke et al. (2017) presentan valores en el rango de 1,4 a 4,0 (W/mK).

Chmura (1970) documenta valores en el rango entre 1,51 a 4,52 (W/mK).

Clark & Weber (1967) presentan un valor típico de 2,5 (W/mK).

El CTE (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2007), presenta un valor de referencia de 3,0 (W/mK).

Según la norma alemana VDI (VDI 4640, 2015), el valor mínimo de la conductividad para areniscas es de 1,3 (W/mK) y el máximo de 5,1 (W/mK).

A continuación, se presenta de forma esquemática una comparación entre el valor de la conductividad térmica para la muestra de estudio obtenida de forma experimental con los rangos de valores de la conductividad térmica para rocas de este tipo recopilados mediante la revisión bibliográfica (figura 23):

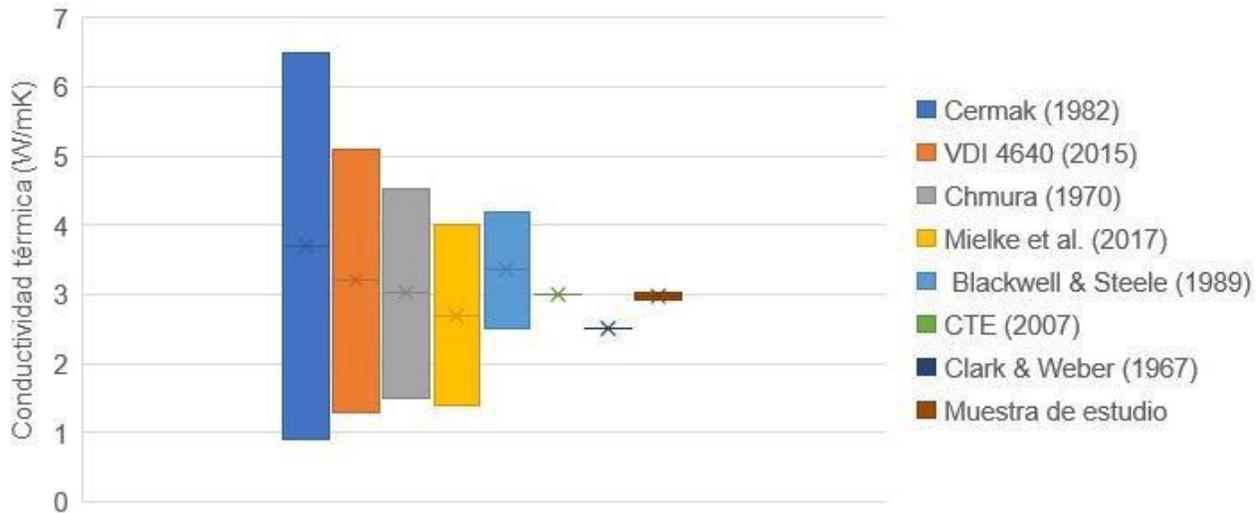


Figura 23: Comparación del valor de k obtenido experimentalmente con los rangos de valores recopilados bibliográficamente.

La figura 23 muestra que el valor de conductividad térmica obtenido de forma experimental para el testigo de roca del experimento (2,92 W/mK) se encuentra dentro del rango esperado.

Si bien los diferentes autores proponen rangos variados para el valor de la conductividad térmica de este tipo de rocas, siendo algunos rangos más acotados que otros, el valor obtenido de forma experimental se encuentra dentro del rango presentado por todos los autores. Cabe destacar que la conductividad térmica obtenida para la muestra de estudio (2,92 W/mK) es la similar a aquella propuesta por el CTE (3,0 W/mK).

Contrariamente, el valor bibliográfico presentado que más se aleja al valor obtenido experimentalmente es aquél propuesto por Clark & Weber (1967) (2,5 W/mK).

4.2 Simulación numérica del experimento con testigos de roca

Con el fin de comparar los resultados obtenidos de forma experimental, se hace uso del COMSOL Multiphysics para conformar un modelo 3D de transferencia de calor en medio sólido que replique el experimento realizado.

Se hace uso del software para simular la transferencia de calor en medio sólido considerando la geometría del sistema, la conductividad térmica obtenida experimentalmente para el testigo de roca y la conductividad térmica de los cilindros de conductividad conocida.

De este modo, a continuación, se exponen las variables que condicionan la geometría del sistema (Tabla 7) y las propiedades térmicas de los materiales (Tabla 8).

Tabla 7: Parámetros Geométricos impuestos al modelo.

Parámetro	Valor asignado
Radio de los especímenes ()	0,025
Espesor cilindros de aluminio ()	0,08
Espesor testigo de roca ()	0,009

Tabla 8: Propiedades del material impuestas en el modelo.

Parámetro	Valor asignado
Conductividad de la roca experiencia 1 ()	3,03
Conductividad de la roca experiencia 2 ()	2,8
Conductividad del Duraluminio 2011 ()	152

Considerando la geometría y disposición de los elementos que conforman el sistema, se obtiene un cilindro de radio igual a 0,025 m y un espesor total igual a 0,169 m (figura 24).

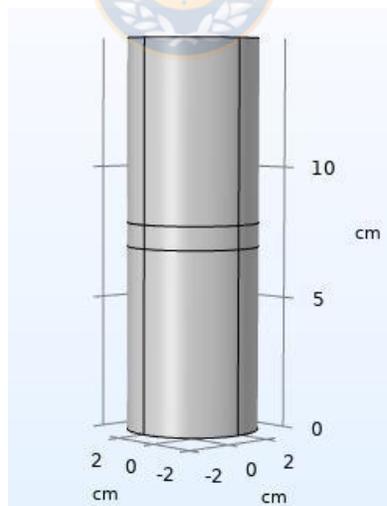


Figura 24: Geometría obtenida para el sistema.

Una vez definida la geometría del sistema, es posible fijar las condiciones de contorno que regirán en los modelos de simulación. De este modo, las condiciones de contorno consideradas para ambos modelos se presentan a continuación:

Para la cara inferior del cilindro (cara expuesta a la fuente de calor), se considera una condición de contorno de tipo 2 (flujo de calor fijo). Se considera que el flujo de calor es el mismo en

todo el sistema, y se puede obtener mediante la ley de Fourier. Para cada experiencia, se considera el valor de conductividad térmica obtenido de forma experimental, el espesor del testigo y la variación de temperatura entre sus extremos. De este modo, se tiene un flujo de calor de $1407,3 \text{ W/m}^2$ para la experiencia 1 y un flujo de calor de $1309,8 \text{ W/m}^2$ para la experiencia 2.

Para la cara superior del cilindro (cara expuesta al ambiente), se considera una condición de contorno de tipo 3 para simular la convección de calor entre la superficie del cilindro y el aire. La temperatura ambiente se define, para cada simulación, realizando un promedio de la temperatura inicial medida por los 4 sensores de temperatura. De este modo, se obtiene un valor de temperatura ambiente de $292,57\text{K}$ para la experiencia 1 y un valor de la temperatura ambiente de $292,09\text{K}$ para la experiencia 2. Además, se utiliza un coeficiente de película de $250 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor típico para el coeficiente de calor por convección, considerando la convección forzada del aire (I. Martínez, 1992).

Finalmente, para la superficie curva de todo el sistema se considera una condición de borde de flujo nulo o aislamiento térmico (condición de contorno tipo 2).

A modo de resumen, en la ilustración expuesta a continuación se exponen de forma esquemática las condiciones de borde del modelo (figura 25):

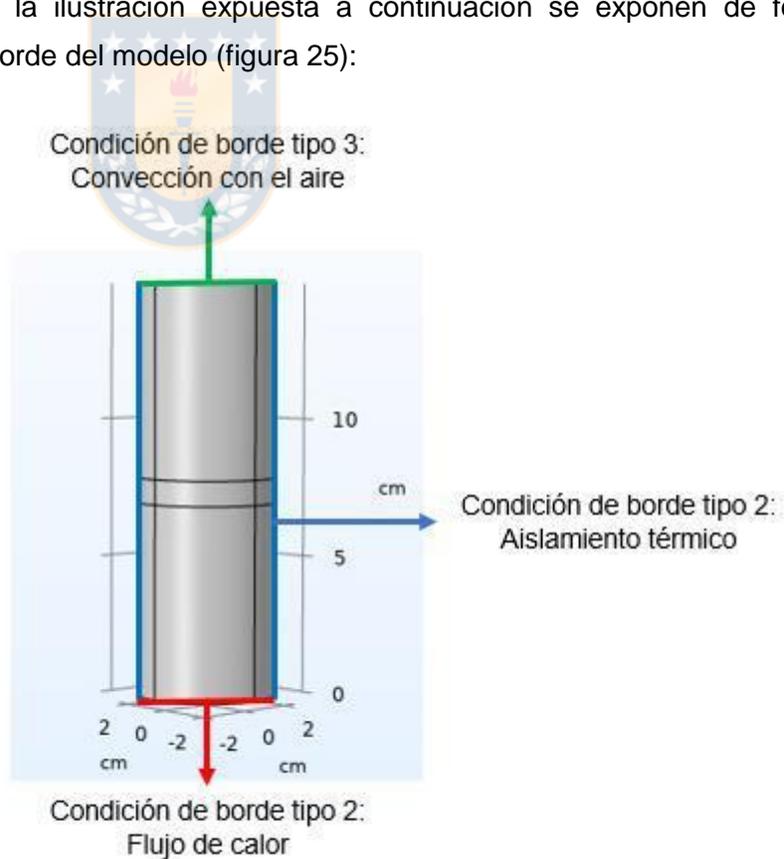


Figura 25: Condiciones de borde aplicadas al modelo.

De este modo, considerando todos los parámetros mencionados, se obtiene un modelo de simulación para cada experiencia realizada (figuras 26 y 27):

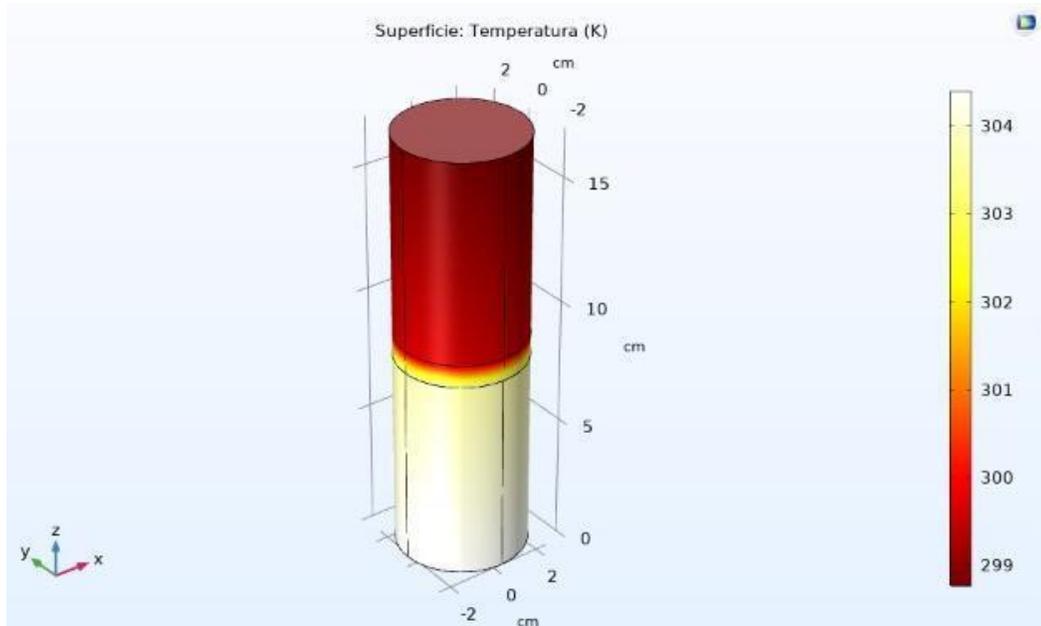


Figura 26: Simulación de la primera experiencia en COMSOL Multiphysics.

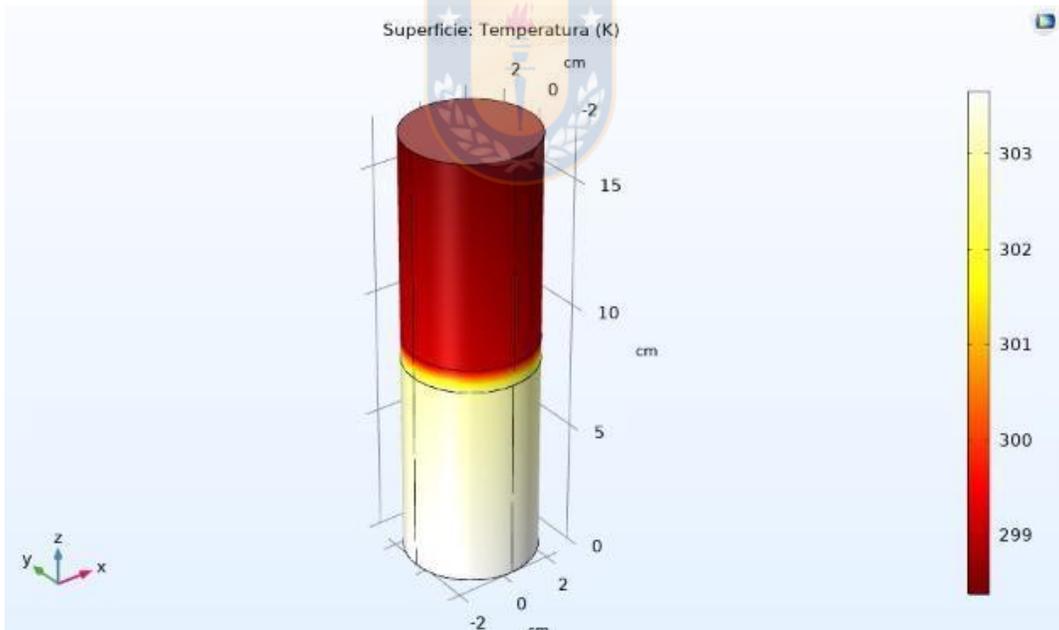


Figura 27: Simulación de la segunda experiencia en COMSOL Multiphysics.

Para poder comparar los valores de temperatura simulados con aquellos medidos de forma experimental, es de especial interés conocer los valores de temperatura en los mismos puntos en los que se encontrarían los sensores de temperatura en el experimento. De este modo, la tabla 9 muestra los valores de temperatura obtenidos mediante ambas simulaciones, contrastándolos con los valores de temperatura medidos experimentalmente, para cada uno de los puntos de interés.

Tabla 9: Temperaturas simuladas en cada sensor para cada experiencia.

sensor	Sim 1	Exp 1	Sim 2	Exp 2
	Temperatura (K)			
T1	304,15	304,15	303,5	304,01
T2	303,48	303,13	302,8	302,92
T3	299,35	298,95	298,96	298,71
T4	298,68	298,21	298,33	298,02

Los valores experimentales medidos con cada sensor durante la fase estable se comparan gráficamente con los valores obtenidos mediante las simulaciones realizadas para cada experiencia, considerando su respectiva conductividad térmica obtenida experimentalmente (figuras 28 y 29). En la misma figura, se grafican los valores obtenidos mediante una serie de simulaciones realizadas variando el valor de la conductividad térmica hasta conseguir una curva que se ajuste de mejor forma a la curva experimental.

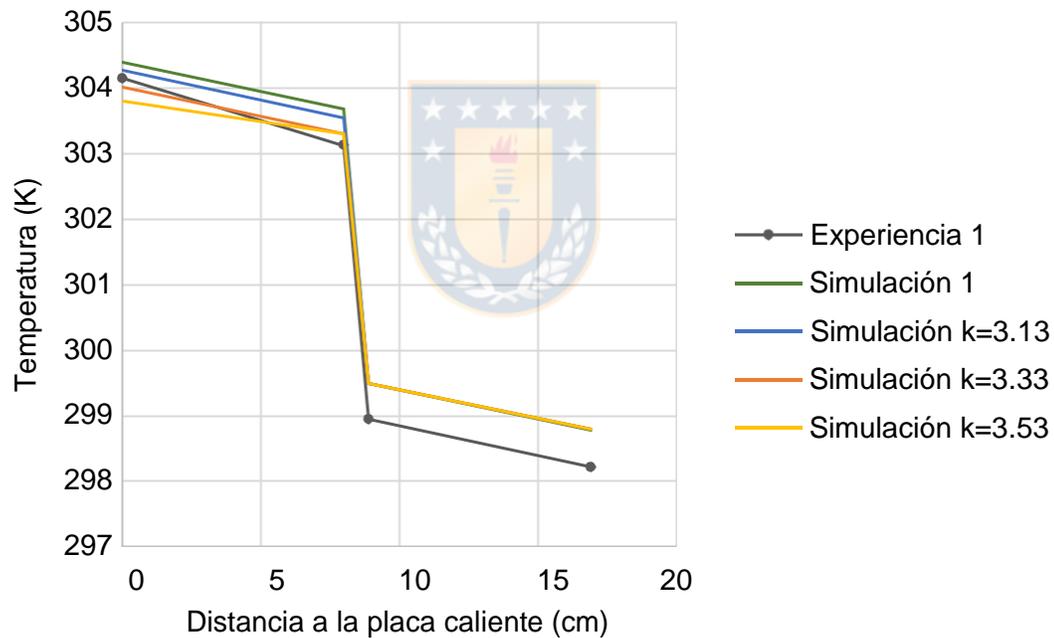


Figura 28: Comparación entre las temperaturas experimentales y las simuladas para la experiencia 1.

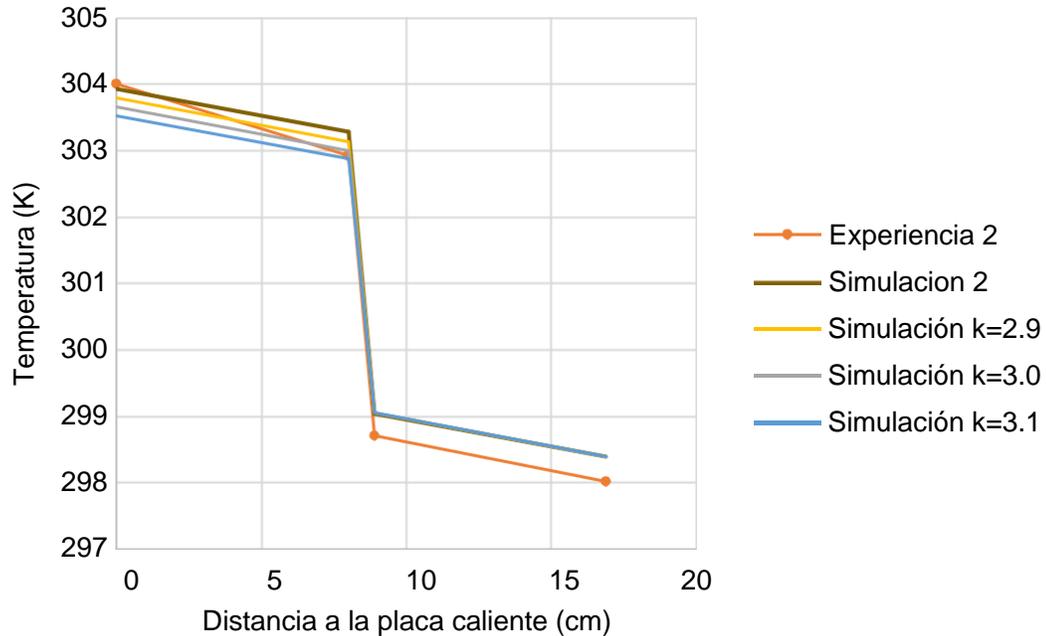


Figura 29: Comparación entre las temperaturas experimentales y las simuladas para la experiencia 2.

En cada caso, para encontrar la curva de valores simulados que mejor se ajuste a la curva de valores experimentales, se debe determinar qué curva simulada presenta el menor error relativo con respecto a la curva experimental.

De este modo, se determina el error relativo de cada valor de temperatura medido experimentalmente durante la fase estable con respecto a su valor simulado, tanto para la experiencia 1 como para la experiencia 2, considerando la siguiente ecuación:

$$= \frac{|T_{\text{teórico}} - T_{\text{experimental}}|}{T_{\text{teórico}}} \cdot 100\% \tag{29}$$

Donde:

representa el error relativo (%)

$T_{\text{teórico}}$ representa el valor teórico obtenido

representa el valor experimental obtenido

Los valores del error relativo entre las temperaturas medidas durante la experiencia 1 y los valores de obtenidos simulando con todos los valores para la conductividad térmica se presentan en la tabla 10:

Tabla 10: Error relativo entre los valores medidos y los simulados para el experimento 1.

Sensor	Sim 1 v/s Exp 1			
	$k=3,03$	$k=3,13$	$k=3,33$	$k=3,53$
	Error de calibración (%)			
T1	0,082	0,043	0,043	0,115
T2	0,184	0,138	0,056	0,056
T3	0,183	0,184	0,184	0,184
T4	0,190	0,194	0,194	0,194
media	0,184	0,140	0,119	0,137

De la Tabla 10 se desprende que la simulación que presenta un menor error relativo con respecto a la experiencia 1 (0,119%) es la que se realizó con un valor de la conductividad térmica igual a 3,33 W/mK.

De este modo, el error de medición entre la conductividad térmica de esta curva y la conductividad térmica medida experimentalmente haciendo uso de los datos de la experiencia 1 es de un 9%.

Al igual que para la experiencia 1, Los valores del error relativo entre las temperaturas medidas durante la experiencia 2 y los valores de obtenidos simulando con todos los valores para la conductividad térmica se presentan en la tabla 11:

Tabla 11: Error relativo entre los valores medidos y los simulados para el experimento 2.

Sensor	Sim 2 v/s Exp 2			
	$k=2,8$	$k=3$	$k=2,9$	$k=3,1$
	Error de calibración (%)			
T1	0,026	0,115	0,069	0,161
T2	0,122	0,026	0,069	0,013
T3	0,114	0,117	0,117	0,117
T4	0,127	0,127	0,127	0,127
media	0,118	0,097	0,096	0,105

De la tabla 11 se desprende que la simulación que presenta un menor error relativo con respecto a la experiencia 2 (0,096%) es la que se realizó con un valor de la conductividad térmica igual a 2,9 W/mK.

De este modo, el error de medición entre la conductividad térmica de esta curva y la conductividad térmica medida experimentalmente haciendo uso de los datos de la experiencia 12 es de un 3,44%.

Cabe destacar que, para ambas experiencias, a pesar de que los errores de medición obtenidos son bajos, las simulaciones de transferencia de calor sugieren una conductividad térmica mayor a la obtenida de forma experimental.



5 Conclusiones

Si bien los diferentes autores proponen rangos variados para el valor de la conductividad térmica en areniscas, el valor promedio obtenido de forma experimental para el testigo de roca (2,92 W/mK) se encuentra dentro de todos los rangos obtenidos mediante la recopilación bibliográfica.

Los resultados comparativos entre las temperaturas simuladas con COMSOL Multiphysics y las temperaturas medidas experimentalmente muestran que el comportamiento del flujo de calor dentro del sistema es coherente en el ámbito de la transferencia de calor en medio sólido.

Gracias al uso del software como herramienta de análisis, fue posible realizar un ajuste a la curva simulada para comprobar que el valor de la conductividad térmica obtenido en la experiencia 1 y la experiencia 2 son coherentes.

Mediante el ajuste del perfil de temperatura obtenido con el software al perfil experimental, se obtuvieron valores de conductividad térmica del mismo orden de magnitud que los valores obtenidos de forma experimental, existiendo una diferencia de un 9% entre la conductividad obtenida experimentalmente para la experiencia 1 (3,03 W/mK) y la obtenida con su simulación (3,33 W/mK), y de un 3,44% entre la conductividad obtenida experimentalmente para la experiencia 2 (2,8 W/mK) y la obtenida con su simulación (2,9 W/mK).

Se confirma que los modelos de simulación se presentan como otra herramienta que permite determinar la conductividad de una roca de forma indirecta a partir de las mediciones de la metodología experimental.

En términos económicos, teniendo en consideración que en el montaje del experimento se gastaron 61.362 CLP, se afirma que el experimento diseñado es adecuado y cumple con el objetivo de determinar la conductividad térmica en testigos de roca un costo bajo.

Es importante señalar que el valor del costo asociado a la conformación del experimento presentado no considera el gasto eléctrico que implica tener la fuente de calor encendida durante un periodo de tiempo prolongado.

Se debe mencionar que, para minimizar el error de cada experiencia, es importante tener un control de las condiciones ambientales, ya que la placa fría está expuesta a las variaciones de temperatura ambiente, y esto condiciona la evolución térmica del experimento.

Por otra parte, es relevante considerar que el valor de la conductividad térmica de una roca no depende sólo de su composición mineralógica, si no que puede variar debido a diversos factores

externos, como lo son la presencia de humedad y de aire dentro del sistema. Considerando esto, se afirma que el valor in-situ presentará siempre algún grado de variación respecto a los experimentos de laboratorio.



6 Bibliografía

- Abuel-naga, H. (2005). *Thermal conductivity and fabric anisotropy of saturated clays THERMAL CONDUCTIVITY AND FABRIC ANISOTROPY OF SATURATED CLAYS*. January 2005.
- Allen, A., & Milenic, D. (2003). Low-enthalpy geothermal energy resources from groundwater in fluvioglacial gravels of buried valleys. *Applied Energy*, 74(1–2), 9–19. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00126-5)
- Antriasian, A. M. (2010). The Portable Electronic Divided Bar (PEDB): a Tool for Measuring Thermal Conductivity of Rock Samples. In *Proceedings World Geothermal Congress*.
- ASTM C 177-19. (2019). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. <https://doi.org/10.1520/C0177-19>
- ASTM C 518-15. (2015). Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. In *ASTM International* (pp. 1–15). <https://doi.org/10.1520/C0518-10.2>
- ASTM D 7984-16. (2016). *Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument* (pp. 1–5). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7984-16>
- ASTM E 598-15. (2015). Standard Test Method for Measuring Extreme Heat-Transfer Rates from High-Energy Environments Using a Transient , Null-Point Calorimeter 1. *Asm, i*(Reapproved), 1–10. <https://doi.org/10.1520/E0598-08.priate>
- ASTM E1225-04. (2004). Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/E1225-04>
- Avtar, R., Tripathi, S., Aggarwal, A. K., & Kumar, P. (2019). Population-urbanization-energy nexus: A review. *Resources*, 8(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/resources8030136>
- Banks, D., Skarphagen, H., Wiltshire, R., & Jessop, C. (2004). Heat pumps as a tool for energy recovery from mining wastes. Geological Society, London, Special Publications, 236(1), 499–513. doi:10.1144/gsl.sp.2004.236.01.27
- Barba, D. (2018). *Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja Determination of thermal properties of soils using the thermal needle probe method*. November.
- Blackwell, D., & Steele, J. (1989). Assessment of the geothermal resources of Kansas. *Biul Kans Geol Surv.*, 1, 226:267–95.
- Blackwell, D. Spafford, R. (1982). *Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Rock Using*

Divided Bar Submitted to AMTS 1982.

- Blázquez, C., Martín, A., García, P., Sánchez, L., & Jiménez, S. (2016). *Analysis of the process of design of a geothermal installation*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.067>
- Blázquez, C., Martín, A., Nieto, I., & González-Aguilera, D. (2017). Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of A geothermal installation. *Energies*, 10 (6). <https://doi.org/10.3390/en10060795>
- Blázquez, C. S., Nieto, I. M., Martín, A. F., González-Aguilera, D., & García, P. C. (2019). Comparative analysis of different methodologies used to estimate the ground thermal conductivity in low enthalpy geothermal systems. *Energies*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/en12091672>
- Bording, T. S., Nielsen, S. B., & Balling, N. (2016). The transient divided bar method for laboratory measurements of thermal properties. *Geophysical Journal International*, 207(3), 1446–1455. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw278>
- Boynton, K., Berkley, M., Perkins, S., & Albert-green, S. (2019). Geothermal Energy in Mining - A Renewable and Reliable Energy Solution. *Fuel and Energy Abstracts*, 36(3), 202. [https://doi.org/10.1016/0140-6701\(95\)80556-7](https://doi.org/10.1016/0140-6701(95)80556-7)
- Carslaw, H. S., Jaeger, J. (1962). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, second ed, 510. <https://doi.org/10.1063/1.3057871>
- Casas, L. C. (2020). *La utilización de fuentes renovables de energía . Importancia de las fincas agroenergéticas*. March.
- Cengel, Y. A. (2006). *Transferencia de calor y masa* (tercera edición).
- Cermak, V., & Rybach, L. (1982). Thermal Conductivity and Specific Heat of Minerals and Rocks. In *Landolt-Börnstein, New Series, Group V, Geophysics and space research* (pp. 305–343). https://doi.org/10.1007/10201894_62
- Chmura, K. (1970). Własności fizyko-termiczne skał niektórych zagłębi górniczych. *Wydawnictwo Śląskie*, 1–228.
- Clark, S. P., & Weber, R. L. (1967). Handbook of Physical Constants, Rev. ed. *Physics Today*, 20(2), 77–78. <https://doi.org/10.1063/1.3034166>
- Díaz-Noriega, R.; Fernández P. y Álvarez, L. (2020) The Challenges of Sustainable Use of Abandoned Underground Flooded Mines as Geothermal Resources. International Congress on Planning for Closure of Mining Operations. Santiago de Chile, 7-11 Septiembre 2020
- De Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In: Van Wijk, WR. (1964) *Physics of plant environment*. In *North- Holland Publ. Co., Amsterdam* (Vol. 98, Issue 1, p. 38 5pp). <https://doi.org/10.1002/qj.49709038628>
- De Vries, D. A., & Peck, A. J. (1958). On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal

- Conductivity with Special Reference to Soils. II. Analysis of Moisture Effects. *Australian Journal of Physics*, 11 (3), 409. <https://doi.org/10.1071/ph580409>
- Ernst & Young. (2014). *Mining: the growing role of renewable energy: Time to rethink traditional energy strategies*. 4.
- Farouki, O. (1981). *Thermal properties of soils*.
- Fernández, P., Montes, J., Esteban, G., & García, F. (2013). *Determinación de la influencia del terreno en la valoración técnica y económica de la instalación geotérmica mediante software EDD y GEO2*. 1–10.
- Fraga, F., & Martínez-Ageitos, J. (2007). *Energías Renovables: ¿la energía del futuro?*. July 2007, 5–10. <https://doi.org/10.13140/2.1.5163.2325>
- Fraseri, A. (2009). Direct Use of Ground Heat for Space Heating and Cooling , in the Low Enthalpy Geothermal Energy Areas Present a Contribution in Country Energy System. *Geothermal Energy*, January.
- Frederick, R. ., & Courtin, S. (2006). *Transferencia de Calor*.
- García de la Noceda, C. (2008). Los recursos geotérmicos. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 16(3), 239–247.
- Gehlin, S. (2002). Thermal Response Test. *Lulea University Of Technology, DOCTORAL THESIS*, 1402–1544.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24(June 2018), 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Gustafsson, A. (2006). Thermal Response Test - Numerical simulations and analyses. *Luleå University of Technology*.
- Gustafsson, S. E. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 62(3), 797–804. <https://doi.org/10.1063/1.1142087>
- He, H., Zhao, Y., Dyck, M. F., Si, B., Jin, H., Lv, J., & Wang, J. (2017). A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*, 12(6), 1281–1300. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0563-z>
- Hernández-Calderón, O., Guitiérrez, R., & Zazueta-Niebla, J. (2015). *Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets*. October. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13109>
- Hidr, D. E. P. V. C., Cedula, U., Hidr, P. V. C., Industrial, F., Hidr, P. V. C., & Industrial, F. (2018). *Ficha técnica PVC hidráulico*.
- Holman, J. P. (1998). Transferencia de calor. In C. F. Madrid, *Mc graw hill* (Octava edi, Vol. 7, Issue

- 11). <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- I. Martinez. (1992). Conveccion termica y masica. In *Termodinamica basica y aplicada* (pp. 269–273).
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., Ingersoll, A. C. (1948). *Heat conduction with engineering, geological, and other applications*.
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (2007). *CTE*.
- Jensen, E. B. (1983). *Mine Water Used to Heat Ventilation Air at Henderson Molybdenum Mine to heating*. January, 17–20.
- Jia, G. S., Ma, Z. D., Zhang, Y. P., Zhao, M., Meng, X. Z., Zhang, L. Y., & Jin, L. W. (2020). Series-parallel resistance method based thermal conductivity model for rock-soil with low or high porosity. *Geothermics*, 84(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101742>
- Joffé, A. F. (1956). HEAT TRANSFER IN SEMICONDUCTORS. *Canadian Journal of Physics*, 34(12A), 1342–1355. <https://doi.org/10.1139/p56-150>
- Johansen, O. (1977). Thermal Conductivity of Soils, Draft Translation Report 637. *Ph.D. Dissertation, Norwegian University of Science and Technology*, 291.
- Jorand, R., Vogt, C., Marquart, G., & Clauser, C. (2013). Effective thermal conductivity of heterogeneous rocks from laboratory experiments and numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10), 5225–5235. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50373>
- Kern, D. Q. (1999). Procesos de transferencia de calor.
- Kukkonen, I., Lindberg, A. (1998). *Thermal properties of rocks at the investigation sites: measured and calculated thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity*. March, 1–29.
- La Touche, G and Preene, M (2011). The potential use of ground energy in the mining industry – exploration to closure. Proceedings of the 11th International Mine Water Association Congress – Mine Water – Managing the Challenges, Aachen, Germany, September 2011, 161–166.
- Labus, M., Labus, K. (2018). Thermal conductivity and diffusivity of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132(3), 1669–1676. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7090-5>
- Lamarche, L., Kaji, S., & Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.003>
- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1464–1474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>
- Lienhard IV, J. H., & Lienhard V, J. H. (2017). A HEAT TRANSFER TEXTBOOK,. In *Phlogiston Press* (fourth edi). <https://doi.org/978-04864793161>

- Línea Verde. (2018). *Energías renovables*.
- Lira-Cortés, L., Rodríguez, G., & Méndez-Lango, O. J. (2008). *Sistema de Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Sólidos Conductores, Diseño y Construcción*. 11.
- Lodhia, S. K. (2018). *Mining and Sustainable Development*.
- Lu, Y., Lu, S., Horton, R., & Ren, T. (2014). An empirical model for estimating soil thermal conductivity from texture, an empirical model for estimating water content, and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 1859–1868. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0218>
- Mac-Lean, C., Cabezas, R., Muñoz, M., & Vargas, L. (2018). Applications of low enthalpy geothermal energy: The case of the faculty of physical and mathematical sciences at the University of Chile. *International Journal of Energy Production and Management*, 3(1), 69–78. <https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N1-69-78>
- Mata, F. J., Onisto, L. J., & Vallentyne, J. R. (2012). Consumption: The other side of population for development. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 12(1), 15–20. <https://doi.org/10.3354/esep00122>
- Matek, B., Gawell, K. (2013). Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis. *The Electricity Journal*, 18(April), 1–19.
- Merino, L. (2007). Las energías renovables. *Haya Comunicación*, 20.
- Mielke, P., Bär, K., & Sass, I. (2017). Determining the relationship of thermal conductivity and compressional wave velocity of common rock types as a basis for reservoir characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 140(April), 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.04.002>
- Ministerio de Energía. (2018). *Informe Final Mesa De Geotermia*.
- Morgensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. *Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice, pt 2*, 652–657.
- Naranjo-Mendoza, C., Wright, A. J., Oyinlola, M. A., & Greenough, R. M. (2018). A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements. *Geothermics*, 76(April), 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.06.003>
- Nian, Y., Wang, X., Xie, K., & Cheng, W. (2020). Estimation of ground thermal properties for coaxial BHE through distributed thermal response test. *Renewable Energy*, 152, 1209–1219. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.006>
- Nope, F. I., & de Santiago, C. (2014). *Medida de la conductividad térmica del suelo en laboratorio. Fundamentos físicos, aplicaciones geotérmicas y relaciones con otros parámetros del suelo*. (Vol. 175, Issue January 2014).

- Pasquale, V., Verdoya, M., & Chiozzi, P. (2015). Geothermics Measurements of rock thermal conductivity with a Transient Divided Bar. *Geothermics*, 53, 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.008>
- Patsa, E., Zyl, D. Van, & Zarrouk, S. J. (2015). *Energía geotérmica en explotaciones mineras : Sinergias y oportunidades a lo largo del ciclo de vida operacional de una mina*. 19–25.
- Pei, W., Yu, W., Li, S., & Zhou, J. (2013). A new method to model the thermal conductivity of soil-rock media in cold regions: An example from permafrost regions tunnel. *Cold Regions Science and Technology*, 95, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.08.001>
- Pontigo, C. B. (2016). *Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria*.
- Popov, E., Goncharov, A., Popov, Y., Spasennykh, M., Chekhonin, E., & Shakirov, A. (2019). *Advanced techniques for determining thermal properties on rock samples and cuttings and indirect estimating for atmospheric and formation conditions Advanced techniques for determining thermal properties on rock samples and cuttings and indirect estimatin*. 0–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012017>
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM Suggested Methods for Determining Thermal Properties of Rocks from Laboratory Tests at Atmospheric Pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10), 4179–4207. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1070-5>
- Preene, M., Younger, P. L. (2014). *Can you take the heat ? – Geothermal energy in mining*. 123(2), 107–118. <https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>
- Progelhof, R. C., Throne, J. L., & Ruetsch, R. R. (1976). Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review. *Polymer Engineering and Science*, 16(9), 615–625. <https://doi.org/10.1002/pen.760160905>
- Rafique, M. M. A. (2015). Modeling and Simulation of Heat Transfer Phenomena. In *Heat Transfer Studies and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/61029>
- Ramstad, R. K., & Beer, H. De. (2008). *Thermal diffusivity measurement at NGU – Status and method development 2005-2008*.
- Raymond, J., & Gosselin, L. (2007). *Geothermal energy resources of active mines*. June 2015.
- Rybach, L., & Signorelli, S. (2010). Country Update of Switzerland. *Proceedings World Geothermal Congress, April*, 25–29.
- Saito, T., Hamamoto, S., Mon, E. E., Takemura, T., Saito, H., Komatsu, T., & Moldrup, P. (2014). Thermal properties of boring core samples from the Kanto area, Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity. *Soils and Foundations*, 54(2), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.02.004>
- Samusya, V., Oksen, Y & Radiuk, M. (2013). Heat Pumps for mine water waste heat recovery. *Mining*

- of mineral deposits* (1st edition), 153–157
- Sanner, B., Mands, E., Sauer, M., & Grundmann, E. (2009). Economic aspects of thermal response test - Advantages, technical improvements, commercial application. *Effstock*, 9.
- Sbarba, H. Dello. (2012). *Heat recovery systems in underground mine ventilation systems and novel mine cooling*.
- Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., & Badr, H. M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38(2), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.02.001>
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., & Kohl, T. (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36(2), 141–166. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.10.006>
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2018). Ciencias De La Tierra 1. In *Geology* (Vol. 1).
- Terzić, M. M., Milošević, N. D., Stepanić, N. M., & Petričević, S. J. (2016). Development of a single-sided guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements. *Thermal Science*, 20(January), S321–S329. <https://doi.org/10.2298/TSC1151009226T>
- Thermal Properties* (2011). 337–372. [https://doi.org/10.1016/S1567-8032\(11\)08009-8](https://doi.org/10.1016/S1567-8032(11)08009-8)
- Toth, A. (2011). *Geothermal Deicing in a Mine Tunnel*.
- Trillo, G. L., & Angulo, V. R. (2008). Guía de la Energía Geotérmica. *Universidad Politécnica Madrid*.
- VDI 4640. (2015). *Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (Blatt 2)*.
- Wardhani, P. A. (2015). Aleaciones De Aluminio Cap 11. *Efikasi Diri Dan Pemahaman Konsep IPA Dengan Hasil Belajar Ilmu Pengetahuan Alam Siswa Sekolah Dasar Negeri Kota Bengkulu*, 6. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wullschleger, S. D., Cahoon, J. E., Ferguson, J. A., & Oosterhuis, D. M. (1991). SURFTEMP: Simulation of Soil Surface Temperature Using the Energy Balance Equation. *Journal of Agronomic Education*, 20(1), 11–15. <https://doi.org/10.2134/jae1991.0011>
- Yan, H., He, H., Dyck, M., Jin, H., Li, M., Si, B., & Lv, J. (2019). A generalized model for estimating effective soil thermal conductivity based on the Kasubuchi algorithm. *Geoderma*, 353(December 2018), 227–242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.031>
- Zhao, X. G., Wang, J., Chen, F., Li, P. F., Ma, L. K., Xie, J. L., & Liu, Y. M. (2016). *Tectonophysics Experimental investigations on the thermal conductivity characteristics of Beishan granitic rocks for China 's HLW disposal*. 683, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.021>

7 Anexos

7.1 Anexo 1

Especificaciones técnicas de los materiales utilizados:

Tabla 12: Especificaciones técnicas de los sensores ds18b20 (Maximintegrated, 2019).

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	Local power (Note 1)	+3,0		+5,5	V
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite power	+3,0		+5,5	V
		Local power (Notes 1, 2)	+3,0		V_{DD}	
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0,5	°C
		-30°C to +100°C (Note 3)			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	V_{IL}	(Notes 1, 4, 5)	-0,3		+0,8	V
Input Logic-High	V_{IH}	Local power	+2,2		The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$	V
		Parasite power (Notes 1,6)	+3,0			
Sink Current	I_L	$V_I/O = 0,4V$	4,0			mA
Standby Current	I_{DDs}	(Notes 7, 8)		750	1.000	nA
Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1,5	mA
DQ Input Current	I_{DQ}	(Note 10)		5		µA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

Tabla 13: Especificaciones técnicas de la placa programable Arduino UNO (Arduino Official Store, 2020).

PARAMETER	CONDITIONS
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)

Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68,6 mm
Width	53,4 mm
Weight	25 g

Tabla 14: Especificaciones técnicas del PVC hidráulico (Hidr et al., 2018).

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Peso específico	1,36 – 1,40	gr/cm ³ a 25°C
Variación longitudinal máx.	> 5 según NCh 1649	%
Coeficiente de dilatación térmica	0,08	mm/(m°C)
Coeficiente de fricción	n = 0.009 c = 150	Manning Hazen - Williams
Punto Vicat (T° de ablandamiento)	76	°C
Constante dieléctrica	4	50/60 ciclos
	3,4	800 ciclos
	3	>1 Millón de ciclos
Factor de disipación	0,02-0,04	800 mil a 1 millón ciclos
Resistencia dieléctrica	20	kw/mm
Conductividad térmica	35×10^{-5}	cal×cm/(cm ² ×s×°C)
Tensión de diseño	100	kg/cm ²
Resistencia a la tracción	450 a 550	kg/cm ²
Resistencia a la compresión	610	kg/cm ²
Módulo de elasticidad	30.000	kg/cm ²

Tabla 15: Especificaciones técnicas del Duraluminio 2011 (Wardhani, 2015).

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Módulo Elástico	72.500	N / mm ²
Módulo Elástico Transversal	27.300	N / mm ²
Peso específico	2,84	g / cm ³
Intervalo de fusión	540–645	°C
Coeficiente de dilatación lineal	23	µm / mK

Conductividad térmica	152	W / mK
Resistividad eléctrica	38–44	$\mu\Omega$ m
Conductividad eléctrica	39–45,5	% IACS

Tabla 16: Especificaciones técnicas del extruido de polietileno (Roca, 2005).

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Alargamiento a la rotura	800	%
Conductividad térmica	0,43	W/Km
Coefficiente de dilatación térmica de 20°C a 50°C	$200 \cdot 10^{-6}$	m/m K
Coefficiente de Fricción	0,2	
Densidad	0,95	g/cm ²
Dureza a la bola		N/mm ²
Dureza "Shore"	D65	
Módulo de elasticidad	900	N/mm ²
Punto de fusión	138	°C
Resistencia Superficial	$1 \cdot 10^{13}$	-
Resistencia al impacto	No es trenca	KJ/m ²
Resistencia a la tracción	28	N/mm ²
Temperatura máxima de uso	80 110	°C °C
Temperatura mínima de uso	-100	°C

7.2 Anexo 2

Presupuestos del experimento:

Tabla 17: Materiales utilizados para la conformación del experimento (con precio en CLP).

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIDAD (CLP)	UNIDADES	PRECIO TOTAL (CLP)
1	Barra de Duraluminio 2011	13.923	1	13.923
2	Sensor digital DS18B20	1.050	5	5.250
3	Placa programable Arduino	9.995	1	9.995
4	Modulo reloj RTC para Arduino	2.990	1	2.990
5	Pack 40 cables Macho/Hembra	2.490	1	2.490
6	Resistencia 4.7 K ohms	100	5	500
7	Protoboard Arduino	534	1	534
8	Tubo PVC 50mm	1.090	1	1.090
9	Copla PVC 50mm	790	1	790
10	Tubo extruido de polietileno	3.900	1	3.900
11	Servicio tornería	20.900	1	19.900
TOTAL				61.362 CLP



7.3 Anexo 3

Código de medición del experimento (Arduino):

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <virtuabotixRTC.h> //Libreria
// CLK -> 6, DAT -> 7, RST -> 8
// SCLK -> 6, I/O -> 7, CE -> 8
virtuabotixRTC myRTC(7, 8, 9); // Si cambiamos los PIN de conexión, debemos cambiar aquí
tambien
OneWire ourWire1(2); //Se establece el pin 2 como bus OneWire
OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 4 como bus OneWire
OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 6 como bus OneWire
OneWire ourWire4(5); //Se establece el pin 8 como bus OneWire
OneWire ourWire5(6); //Se establece el pin 10 como bus OneWire5
DallasTemperature sensors1(&ourWire1); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor1
DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor2
DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor3
DallasTemperature sensors4(&ourWire4); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor4
DallasTemperature sensors5(&ourWire5); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor4
void setup() {
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  sensors1.begin(); //Se inicia el sensor 1
  sensors2.begin(); //Se inicia el sensor 2
  sensors3.begin(); //Se inicia el sensor 1
  sensors4.begin(); //Se inicia el sensor 2
  sensors5.begin(); //Se inicia el sensor 2
  // Para ajustar la fecha y hora, debemos utilizar el siguiente formato:
  // segundos, minutos, horas, día de la semana, numero de día, mes y año
  myRTC.setDS1302Time(00, 00, 00, 1, 1, 1, 2020); // SS, MM, HH, DW, DD, MM,
  YYYY /* después de ajustar la hora la línea de arriba se debe comentar o eliminar
  * para que la fecha y hora quede grabada
  */
  // La configuración de fecha y hora ha sido ajustada
}
void loop() {
  //get data from sensors
  sensors1.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp1= sensors1.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor
  1 sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp2= sensors2.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor
  2 sensors3.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp3= sensors3.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor
  3 sensors4.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp4= sensors4.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor
  4 sensors5.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp5= sensors5.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor 5
  // Esta función actualiza las variables para obtener resultados actuales
  myRTC.updateTime();
  // Se imprime el resultado en el Monitor Serial
  //Serial.print("Fecha y hora actual: ");
```

```
//Serial.print(" ");
//Serial.print(myRTC.dayofmonth); // Se puede cambiar entre día y mes si se utiliza el sistema
Americano
//Serial.print(";");
//Serial.print(myRTC.month);
//Serial.print(";");
//Serial.print(myRTC.year);
//Serial.print(";");
//Serial.print(myRTC.hours);
//Serial.print(";");
//Serial.print(myRTC.minutes);
//Serial.print(";");
//Serial.print(myRTC.seconds);
//Serial.print(";");
//print data to serial port
Serial.print(temp1);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp2);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp3);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp4);
Serial.print("\t");
Serial.println(temp5);
//Serial.println("");
//Serial.println("");
delay(100);
}
```



7.4 Anexo 4

Código de almacenamiento de datos del experimento 2 (Python):

```

function varargout = GUI_sensores_temperatura_V2(varargin)
% GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2 MATLAB code for GUI_sensores_temperatura_V2.fig
%   GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2, by itself, creates a new
%
%   singleton*.
%
%   H = GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2 returns the handle to a
new GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2 or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...
) calls the local
%   function named CALLBACK in GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2.M with the
given input arguments.
%
%   GUI_SENSORES_TEMPERATURA_V2('Property','Value',...) creates a new
%
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn
gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn
via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help GUI_sensores_temperatura_V2

% Last Modified by GUIDE v2.5 22-Aug-2019 04:08:51
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn',  @GUI_sensores_temperatura_V2_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn',  [] , ...
'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1}); end
if nargout
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:}); else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before GUI_sensores_temperatura_V2 is made visible.
function GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to GUI_sensores_temperatura_V2 (see

% Choose default command line output for
GUI_sensores_temperatura_V2 handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% Reinicio de Variables
globales clear pserial;
clear val; clear
lectura; clear
stop_flag; global
stop_flag;
stop_flag=false;
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUI_sensores_temperatura_V2_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles
structure varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in read_pushbutton1.
function read_pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to read_pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Establecer conexion con puerto COM
global pserial;
pcom='COM7';%Ingresar manualmente puerto COM
delete(instrfind({'Port'},{pcom}))% cierra toda conexion serial con el
puerto COM
pserial = serial(pcom,'BaudRate',9600);% configura la conexion serial
%fopen(pserial); % abrir puerto serial
set(handles.text_test,'String',strcat('Conectado con puerto serial : ',pcom));
% Estado de banderas y
contadores global stop_
flag;%stop flag global minr
stop_flag=false;
ii=0; %Contador mediciones
igraph=0; %Contador ploteo
t_zero=now;
t_save=now;% tiempo de referencia guardado
minr=60;% tiempo de guardado en minutos
%set(handles.text_test,'String',num2str(stop_flag))
;
% Ploteo
global lectura
global val
cc=jet(11);
cla
h1 = animatedline('DisplayName','Sensor 1','Color',cc(10',:));
h2 = animatedline('DisplayName','Sensor 2','Color',cc(9',:));
h3 = animatedline('DisplayName','Sensor 3','Color',cc(8',:));
h4 = animatedline('DisplayName','Sensor 4','Color',cc(7',:));
h5 = animatedline('DisplayName','Sensor 5','Color',cc(5',:));
% h6 = animatedline('DisplayName','Sensor 6 - 12 cm','Color',cc(6',:));

```

```

% h7 = animatedline('DisplayName','Sensor 7 - 15 cm','Color',cc(7',:));
% h8 = animatedline('DisplayName','Sensor 8 - 18 cm','Color',cc(8',:));
% h9 = animatedline('DisplayName','Sensor 9 - 20 cm','Color',cc(9',:));
% h10 = animatedline('DisplayName','Sensor10 - 25
cm','Color',cc(10',:)); legend('show','Location','northeastoutside');
ax = gca;
ax.YGrid = 'on';
ax.XGrid = 'on';
ax.Position=[0.0231 0.4316 0.5240
0.5442]; ax.Box='on';
% xticks=get(gca,'xtick');
% set(gca,'xticklabel',cellstr(datestr(xticks))')
nfile=0; %contador de archivos
% loop
while stop_flag==false
tic;
ii = ii + 1;
igraph=igraph+1;
ylim([0 100]);
xlim([0 igraph+1]);
fopen(pserial); % abrir puerto
serial lectura=fscanf(pserial,'%f');
if length(lectura)< 5
%msgbox('error a las 2 horas')
disp('error en lectura')
if ii>1
val(ii,:)= val(ii-
1,:); end
else ahora=now;
val(ii,1)=year(ahora);
val(ii,2)=month(ahora);
val(ii,3)=day(ahora);
val(ii,4)=hour(ahora);
val(ii,5)=minute(ahora);
val(ii,6)=second(ahora);
val(ii,7)=lectura(1,1); %sensor
val(ii,8)=lectura(2,1); %sensor
val(ii,9)=lectura(3,1); %sensor
val(ii,10)=lectura(4,1); %sensor
val(ii,11)=lectura(5,1); %sensor

% val(ii,12)=lectura(6,1); %sensor
% val(ii,13)=lectura(7,1); %sensor
% val(ii,14)=lectura(8,1); %sensor
% val(ii,15)=lectura(9,1); %sensor
% val(ii,16)=lectura(10,1);
%sensor fclose(pserial);
% Add points to animation
addpoints(h1,igraph,val(ii,7)); %linea sensor 1
addpoints(h2,igraph,val(ii,8)) %linea sensor 2
addpoints(h3,igraph,val(ii,9)) %linea sensor 3
addpoints(h4,igraph,val(ii,10)) %linea sensor 4
addpoints(h5,igraph,val(ii,11)) %linea sensor 5
% addpoints(h6,igraph,val(ii,12)) %linea sensor 6
% addpoints(h7,igraph,val(ii,13)) %linea sensor 7
% addpoints(h8,igraph,val(ii,14)) %linea sensor 8
% addpoints(h9,igraph,val(ii,15)) %linea sensor 9
% addpoints(h10,igraph,val(ii,16)) %linea sensor 10

```



```

% Update axes
%     ax.XLim = datenum([t-seconds(15) t]);
%     datetick('x','keeplimits')
drawnow
set(handles.txts1,'String',strcat(num2str(val(ii,7)),' °C'));
set(handles.txts2,'String',strcat(num2str(val(ii,8)),' °C'));
set(handles.txts3,'String',strcat(num2str(val(ii,9)),' °C'));
set(handles.txts4,'String',strcat(num2str(val(ii,10)),' °C'));
set(handles.txts5,'String',strcat(num2str(val(ii,11)),' °C'));
%     set(handles.txts6,'String',strcat(num2str(val(ii,12)),' °C'));
%     set(handles.txts7,'String',strcat(num2str(val(ii,13)),' °C'));
%     set(handles.txts8,'String',strcat(num2str(val(ii,14)),' °C'));
%     set(handles.txts9,'String',strcat(num2str(val(ii,15)),' °C'));
%     set(handles.txts10,'String',strcat(num2str(val(ii,16)),'
°C')); if now>t_save+1/24*minr/60
nfile=nfile+1;
%
filename=strcat('C:\Users\EXP_GEOTERMIA\Desktop\Rutero_mt\','rdata_sensores_A',
num2str(nfile),'_',num2str(day(now)),'-',num2str(month(now)),'-
',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-',num2str(minute(now)),'.csv');
%     csvwrite(filename,val)
filename22=strcat('data_sensores_A',num2str(nfile),'_',num2str(day(now)),'-
',num2str(month(now)),'-',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-
',num2str(minute(now)),'.csv');
csvwrite(filename22,val)
t_save=now;
clear val
ii=0;
set(handles.text_test,'String',strcat('Save as :', filename22 ));
end
end
pause(5-toc)
end
if stop_flag==true
%     set(handles.text_test,'String','yes');
filename=strcat('data_sensores_',num2str(day(now)),'-',num2str(month(now)),'-
',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-',num2str(minute(now)),'.csv');
csvwrite(filename,val)
fclose(pserial);
end
% --- Executes on button press in stop_pushbutton4.
function stop_pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to stop_pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
global stop_flag;
stop_flag=true;
set(handles.text_test,'String',num2str(stop_flag)); %
--- Executes when user attempts to close figure1.
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Hint: delete(hObject) closes the figure
delete(hObject);
% -----
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to Untitled_1 (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on selection change in popupmenu2. function
popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%          contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu2
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white'); end
```



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Determinación experimental de la conductividad térmica en testigos de roca		
Nombre Memorista: Gabriel Alonso Cáceres Crovetto		
Modalidad	Investigación	Profesor Patrocinante
Concepto	Excelente	 Prof. Ramón Díaz N.
Calificación	6.8	
Fecha	30/9/2020	
 Prof. Fernando Parada		
		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Jorge Villarroel V.		 Prof. Fernando Parada L.
Resumen		
<p>El presente documento detalla el desarrollo de un experimento realizado con tecnología de bajo costo para determinar la conductividad térmica en testigos de roca.</p> <p>La configuración para este experimento consiste en generar un flujo de calor axial a lo largo de un testigo de roca de conductividad térmica desconocida, posicionado entre dos cilindros de conductividad térmica conocida. Mediante el uso de sensores dispuestos transversalmente a lo largo del sistema, se mide la fluctuación de la temperatura en los extremos de cada uno de sus componentes.</p> <p>La medida en tiempo real de temperaturas es realizada con sensores ds18b20, gestionados mediante un Arduino, y almacenada en un ordenador portátil. Los datos son analizados e interpretados según un modelo fisicomatemático analítico de transferencia de calor por conducción, seleccionado previamente en función de los objetivos propuestos mediante una revisión bibliográfica.</p> <p>El resultado experimental de conductividad térmica obtenido para el testigo de roca (3,02 W/mK) es comprobado de forma satisfactoria por dos vías. La primera comprobación se realiza mediante la comparación con valores documentados por diferentes investigadores. En segundo lugar, se realizan simulaciones numéricas con el software COMSOL Multiphysics.</p> <p>Finalmente, se concluye que la metodología empleada y la instrumentación de bajo costo seleccionada permite obtener resultados adecuados en la caracterización de la conductividad térmica en testigos de roca y pueden ser empleados con ciertas garantías de confiabilidad con un costo de implementación bajo (61.362 CLP).</p>		