



**Diseño de un prototipo geotérmico con intercambiador de calor tierra-aire para
la climatización de viviendas con condiciones ambientales de temperatura
mayores a 30 °C**

Ángel David Valenzuela Ramírez

20451717507

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2022

**Diseño de un prototipo geotérmico con intercambiador de calor tierra-aire para
la climatización de viviendas con condiciones ambientales de temperatura
mayores a 30 °C**

Ángel David Valenzuela Ramírez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ingeniera Martha Lucia Solano Moreno

Línea de Investigación:

Diseño mecánico de elementos de maquinas

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

Pág.

Preliminares.....	XVIII
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
1. Capítulo 1: Marco Teórico.....	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Energías renovables	14
1.3 Energía geotérmica	15
1.3.1 Alta Entalpía	20
1.3.2 Muy baja Entalpía	21
1.4 Características del terreno	23
1.4.1 Conductividad térmica	24
1.4.2 Capacidad calorífica	25
1.5 Intercambiadores de calor.....	26
1.5.1 Captación vertical	27
1.5.2 Captación horizontal	28
1.5.3 Pozos canadienses o provenzales	29
2. Capítulo 2: Estado del Arte	34
2.1 Estado del arte	34
2.1.1 Estado actual de la energía geotérmica en Colombia	35
2.1.2 Investigaciones y aportes al tema a nivel nacional	37
2.1.3 Investigaciones y aportes al tema a nivel internacional.....	41
3. Capítulo 3: Cálculos y criterios de diseño	47
3.1 Dimensionado y método de cálculo.....	47
3.1.1 Análisis de parámetros de diseño	48
3.1.2 Dimensiones del intercambio de calor	49
3.1.3 Eficiencia del intercambiador de calor y NTU	49
3.1.4 Influencia de NTU en la transferencia de calor.....	52

3.1.5	<i>Influencia de la caída de presión</i>	54
3.1.6	<i>Caída de presión específica</i>	54
3.2	Elementos de instalación	57
3.2.1	<i>Punto de captación de aire y filtros</i>	58
3.2.2	<i>Punto de drenaje de condensados</i>	59
3.2.3	<i>Elementos de circulación de aire</i>	59
3.3	Caso de estudio para el diseño del ICTA	60
3.3.1	<i>Diámetro, longitud y disposición</i>	63
3.3.2	<i>Cálculos preliminares</i>	65
4.	Capítulo 4: Simulación y validación	69
4.1	Elementos de ensamblaje	69
4.2	Resultados de la simulación	71
4.3	Análisis comparativo de resultados	76
4.3.1	<i>Longitud en el intercambiador de calor tierra-aire</i>	76
4.3.2	<i>Diámetro en el intercambiador de calor tierra-aire</i>	78
4.3.3	<i>Velocidad en el intercambiador de calor tierra-aire</i>	79
	Conclusiones	81
	Anexos	83
	Referencias Bibliográficas	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1. Evolución de la energía mundial primaria desde 1990 hasta 2035 expresada en unidades de energía llamadas Btoe	11
Figura 1-2. Producción de energía en Colombia	12
Figura 1-3. Principales aplicaciones de las tecnologías geotérmicas	17
Figura 1-4. Recursos geotérmicos globales	19
Figura 1-5. Temperatura del suelo en relación con la profundidad	22
Figura 1-6. Representación gráfica de las instalaciones geotérmicas acopladas al subsuelo	27
Figura 1-7. Esquema de instalaciones geotérmicas acopladas al subsuelo	28
Figura 1-8. Sistema de climatización utilizando tubos enterrados	29
Figura 1-9. Distribución directo aislado	31
Figura 1-10. Distribución techelmann	32
Figura 1-11. Distribución bloque techelmann	33
Figura 2-1. Países que utilizan recursos geotérmicos a baja temperatura	35
Figura 2-2. Temperatura del suelo a una profundidad de 3 metros	38
Figura 2-3. Localización de la Universidad EIA sede Las Palmas	40
Figura 2-4. Plano vista lateral con sistema de climatización pozo provenzal	42
Figura 2-5. Plano corte en detalle de instalación	42
Figura 2-6. Funcionamiento intercambiador AWADUKT de Rehau	46
Figura 2-7. Intercambiador AWADUKT THERMO aplicaciones residenciales	47
Figura 3-1. Diagrama de flujo para los cálculos del sistema	56
Figura 3-2. Punto de captación de aire y filtros ICTA	59
Figura 3-3. Planta arquitectónica casa hueso propuesta de proyecto urbanístico	61
Figura 3-4. Disposición de los tubos enterrado en una franja del suelo	63
Figura 3-5. Planta arquitectónica casa hueso con sistema ICTA	64
Figura 3-6. Soplador e inyector de aire para el ICTA	67
Figura 4-1. Intercambiador de calor tierra-aire ensamblaje final	69
Figura 4-2. Tubería PVC	70
Figura 4-3. Uniones y conexiones PVC	70
Figura 4-4. Puntos de entrada y salida del fluido del sistema	71
Figura 4-5. Comportamiento térmico del fluido al interior del ICTA según las condiciones de temperatura en Kelvin	72
Figura 4-6. Isométrico del comportamiento térmico del fluido al interior del ICTA	73
Figura 4-7. Isométrico ICTA comportamiento de la velocidad del fluido	74
Figura 4-8. Isométrico ICTA comportamiento de la densidad del aire	75
Figura 4-9. Variación de la temperatura de salida vs longitud del ducto	77

Figura 4-10. Variación de la temperatura de salida vs diámetro del ducto.....	79
Figura 4-11. Variación de la temperatura de salida vs la velocidad del aire	80

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1-1. Demanda de energía eléctrica SIN en Colombia (GWh-año)</i>	13
<i>Tabla 1-2. Aplicación de las tecnologías de los recursos renovables</i>	15
<i>Tabla 1-3. Clasificación por Entalpía</i>	17
<i>Tabla 1-4. Propiedades de transferencia de calor para tipos de suelos.....</i>	25
<i>Tabla 3-1. Conductividad térmica de los materiales más empleados.....</i>	57
<i>Tabla 3-2. Dimensiones y renovaciones por hora de la vivienda</i>	62
<i>Tabla 3-3. Caudal y renovaciones de aire necesarias.....</i>	62
<i>Tabla 3-4. Parámetros de diseño a considerar.....</i>	65
<i>Tabla 3-5. Variables de parámetros de diseño iniciales.....</i>	66
<i>Tabla 3-6. Resultados de cálculos según plantilla programada en Excel.....</i>	67
<i>Tabla 3-7. Resultados obtenidos de temperatura de salida y eficiencia del ICTA</i>	68
<i>Tabla 4-1. Resumen de resultados del ICTA</i>	76
<i>Tabla 4-2. Resultado de la temperatura de salida si varía la longitud del ICTA</i>	77
<i>Tabla 4-3. Resultado de la temperatura de salida si varía el diámetro de los ductos del ICTA.....</i>	78
<i>Tabla 4-4. Resultado de la temperatura de salida si varía la velocidad del aire al interior de los ductos del ICTA.....</i>	80

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área transferencia de calor	m^2	πDL
C_p	Capacidad térmica	$\frac{J}{KgK}$	ver Anexo C
D	Diámetro del tubo	m	
h	Coefficiente de convección	$\frac{W}{mK}$	Ec. 3.9
L	Longitud del tubo	m	
\dot{m}	Caudal masico de aire	$\frac{Kg}{s}$	Ec. 3.15
n	Número de tubos		
NTU	Número de unidades de transferencia		Ec. 3.7
Nu	Número Nusselt		Ec. 3.11
Pr	Número Prandtl		Ec. 3.14
Δp	Caída de presión	Pa	Ec. 3.16
\dot{Q}	Calor transferido	W	Ec. 3.1
R	Resistencia térmica	$\frac{K}{W}$	Ver Anexo A
Re	Número Reynolds		Ec. 3.13
T	Temperatura	K	
ΔT_{lm}	Diferencia de temperatura logarítmica	K	Ec. 3.3
V	Velocidad	$\frac{m}{s}$	
\dot{V}	Caudal volumétrico de aire	$\frac{m^3}{s}$	

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ϵ	Efectividad ICTA	%	Ec. 3.5
λ	Conductividad térmica	$\frac{W}{m^2 K}$	
ξ	Factor de fricción		Ec. 3.12
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{m^2}{s}$	
ρ	Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	

Subíndices

Subíndice	Término
-----------	---------

aire	Del aire
en	En la salida del intercambiador
pared	De la pared del tubo
sal	En la salida del intercambiador
suelo	De el suelo
tot	Total

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

<i>CO2</i>	Dióxido de carbono
<i>DFC</i>	Dinámica de fluidos computacional
<i>HVAC</i>	Heating, Ventilating and Air Conditioning
<i>ICTA</i>	Intercambiador de calor tierra-aire
<i>MWe</i>	Mega Wattio eléctrico
<i>TJ</i>	Tera Joules
<i>TW</i>	Tera Watts

Preliminares

(Dedicatoria)

A mis padres, a mí y a las personas cercanas que estuvieron presente y formaron parte del desarrollo de mi formación académica profesional, con su apoyo incondicional y sus palabras de motivación, permitieron la elaboración de este proyecto de investigación.

Agradecimientos

En las siguientes líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible que este proyecto de investigación se materializara.

Dicen que la mejor herencia que nos pueden dejar los padres son los estudios, por lo tanto, quiero agradecer a mis padres, Francy Ramírez y Elías Valenzuela, por todo su amor, comprensión, apoyo, y sobre todo por la motivación que me ha mantenido en mi camino; muchas gracias por ser pacientes y por darme la libertad de mis actos.

A mi hermana Karen Valenzuela y a mi abuelita Silvia Ramírez, por enseñarme a luchar por las causas, las metas, los sueños y los anhelos que hacen latir más fuerte el corazón.

A mi compañero Edgar Mauricio Argüello, por llenarme de alegría día tras día, por su inversión de seis mil pesos, por apoyarme en todos los momentos y por enseñarme a valorar el tiempo que comparten conmigo.

Un agradecimiento especial para mis amigos; Fabián, Karol, Néstor, Brayan, Jesús, Juan, Sebastián, Víctor; que me apoyaron en los momentos difíciles, alegres, tristes y, a todas las personas con quienes compartí dentro y fuera de las aulas, que de una u otra forma contribuyeron durante esta etapa de vida universitaria.

A la ingeniera Martha Lucia Solano y al Dr. Karel Joel Arencibia, por brindarme su apoyo profesional a lo largo de mi carrera universitaria, y sus aportes al desarrollo de esta investigación a través de sus consejos y correcciones.

También me gustaría agradecer a la Universidad Antonio Nariño y su plantel educativo por los valiosos recursos académicos y profesionales otorgados al desarrollo de mi profesión

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo por perseverar, por no renunciar a mis sueños y por dar siempre todo lo mejor de mí sin esperar nada a cambio.

Resumen

Una parte de la contaminación ambiental del planeta puede atribuirse a las actividades de construcción, por lo que, se hace necesario implementar medidas que propicien el uso de sistemas de eficiencia energética; por lo anterior, el informe Bruntland publicado para las Naciones Unidas en 1987, las declaraciones estipuladas en Río de Janeiro sobre el año 1992 y el denominado Protocolo de Kioto, promueven el compromiso para que los estados actúen frente a la crisis energética global y a implementar energías renovables, esta investigación se desarrolla para brindar una alternativa de solución energética a los sistemas de climatización convencionales.

Este proyecto pretende analizar el funcionamiento de un sistema de climatización geotérmico por intercambiador de calor tierra-aire (ICTA), la cual se dividió en una fase de estudio teórico y estudio práctico, se recolectaron 65 variables ambientales, térmicas y dimensionales, las cuales se analizaron matemáticamente mediante cálculos con la ayuda del modelo de análisis térmico de De Paepe & Janssens. Los resultados obtenidos fueron: 20,4 °C de temperatura de salida, 248 W de calor total transferido, una caída de presión de 165,68 Pa y una eficiencia del 72% del ICTA.

A través del diseño del prototipo en SolidWorks® y simulación CFD - Flow Simulation se evidencia el comportamiento dinámico y térmico, que a su vez valida los resultados obtenidos. Al obtener una diferencia de temperatura de 9,6 °C, se concluye que el dispositivo es viable puesto que ofrece comodidad térmica dentro de la vivienda.

Palabras clave: Intercambiador de calor aire-tierra, energías renovables, eficiencia energética, climatización, confort térmico, CFD.

Abstract

A part of the environmental pollution of the planet can be attributed to construction activities, therefore, it is necessary to implement measures that promote the use of energy efficiency systems; Therefore, the Bruntland report published for the United Nations in 1987, the declarations stipulated in Rio de Janeiro on the year 1992 and the so-called Kyoto Protocol, promote the commitment for states to act in the face of the global energy crisis and to implement renewable energies. renewable, this research is developed to provide an alternative energy solution to conventional air conditioning systems.

This project aims to analyze the operation of a geothermal air conditioning system by ground-air heat exchanger (GAHE), which was divided into a phase of theoretical study and practical study, 65 environmental, thermal and dimensional variables were collected, which are mathematically analyzed by calculations with the help of the De Paepe & Janssens thermal analysis model. The results obtained were: 20.4 °C of outlet temperature, 248 W of total heat transferred, a pressure drop of 165.68 Pa and an efficiency of 72% of the GAHE.

Through the design of the prototype in SolidWorks® and CFD simulation - Flow Simulation, the dynamic and thermal behavior is evidenced, which in turn validates the results obtained. Obtaining a temperature difference of 9.6 °C, it is concluded that the device is viable since it offers thermal comfort inside the house.

Keywords: Ground-air heat exchanger, Renewable energy, Energy efficiency, Air conditioning, Thermal comfort, CFD.

Introducción

A lo largo de los años, la población presenta una dependencia exponencial de la energía, en todas sus formas, pero mayoritariamente eléctrica, adicional a ello la deteriorización medioambiental a causa de la generación de energía eléctrica para suplir la demanda energética (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019). Gran cantidad de la energía que se consume en las edificaciones son para usos térmicos, como la climatización. Esta energía se produce a partir de combustibles fósiles, como los derivados del petróleo, que tiene consecuencias negativas sobre el medio ambiente (Marc De Val, 2014).

Desde tiempo atrás, la humanidad ha usado los recursos naturales disponibles con eficiencias alternas, aprovechándolos a diferentes escalas. La energía geotérmica que emana del interior del planeta, es uno de los recursos potenciales menos aprovechados, sin embargo, debido a la estructura geológica de la tierra, representa una fuente de gran aprovechamiento en las capas superiores e incluso, al ser liberada en la corteza. Tomado de (Bottazzi, 2021).

Actualmente, la implementación de la energía geotérmica en el país es escasa, principalmente por el desconocimiento en las metodologías y la carencia de tecnologías y proyectos en materia de desarrollo geotérmico. Colombia se ha centrado principalmente a realizar estudios de los proyectos geotérmicos y las naciones que han implementado su desarrollo con base en los compromisos adquiridos en los tratados anteriormente mencionados, Río de Janeiro 1992 y Kioto 1997 (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

El cambio climático y la demanda energética en constante aumento son factores importantes a tener en cuenta, debido a estos, se han implementado acuerdos como el de Río de Janeiro de 1972, sobre el medio ambiente y el Protocolo de Kioto de 1997, el informe de Bruntland de 1987 sobre medio ambiente y desarrollo sostenible, con el propósito de crear en los estados el compromiso de actuar frente a la crisis energética global y a implementar energías renovables para mitigar esta problemática (Bruntland, 1987).

La humanidad cruza por una crisis energética que afecta a toda la población, por lo que, se requieren soluciones a corto plazo que puedan mitigar los grandes efectos de las industrias y la sobrepoblación; esto, antes de agotar los combustibles fósiles. El desafío del mundo moderno recae en el uso de energías limpias, que contrarresten los procesos del cambio climático y permitan un desarrollo futuro sostenible. Con base en lo anterior, el objetivo ha sido la búsqueda de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los recursos disponibles para la generación de energías renovables, tales como energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, la biomasa y los biocarburantes (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

En la época actual, es impensable vivir sin iluminación, calefacción, refrigeración, transporte; se ha generado una dependencia de la cotidianidad al consumo energético (Isgro, 2013).

De acuerdo con (Gutierrez Soleibe, 2021), los sistemas de climatización convencionales, o HVAC por sus siglas en inglés (Heating, Ventilating and Air

Conditioning), consumen un 40% de la energía doméstica total, situando a Colombia como uno de los países que consumen más del 25% en hogares y oficinas.

A medida que la temperatura ambiente se aleja de la que produce sensación de bienestar o confort, se activan mecanismos fisiológicos automáticos de termorregulación, efectos agudos aparecen a la exposición al calor o temperaturas elevadas, podemos encontrar desde dermatitis, insolación, quemaduras y calambres hasta el agotamiento por calor y el golpe de calor, con un aumento patológico de la temperatura del cuerpo y fracaso multiorgánico, todo esto debido a que el hipotálamo no puede adaptarse a estar altas temperaturas ambientales (Gil Linares, Carmona Alférez, Burgos Ortiz, & Jiménez, 2017).

Gracias a los sistemas de climatización ecológicos, es posible generar confort dentro de las estructuras residenciales y así mitigar los efectos de salud provocados por los golpes de calor y las elevadas temperaturas, adicionalmente, contribuyen al desarrollo sostenible y medioambiental que hoy en día afecta a la población, debido a su bajo impacto con el ecosistema.

Factores económicos derivados de la demanda energética que se viene presentando e incrementando a nivel mundial promueven el uso de herramientas y tecnologías autosostenibles y de menor consumo de energía eléctrica, con la implementación de pozos provenzales para la climatización en las estructuras residenciales, se pretende generar un ahorro energético para reducir el consumo y promover los beneficios económicos para cada vivienda residencial que actualmente utilice sistemas de acondicionamiento convencionales.

De acuerdo con lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es viable la implementación de sistemas de climatización por geotermia para generar beneficios ambientales y económicos, y a su vez, desarrollar el empleo de energías renovables en el país?

Para la ejecución y desarrollo de este proyecto se estableció como objetivo general “Diseñar y modelar un prototipo de un sistema de climatización con intercambiador de calor tierra-aire por energía geotérmica.”; este objetivo se compone de unos objetivos específicos comprendidos de la siguiente manera:

- Caracterizar las variables ambientales, los materiales y los componentes mecánicos necesarios para el funcionamiento del sistema de climatización.
- Establecer los requerimientos técnicos para el diseño del prototipo mediante métodos de análisis térmico y los cálculos que se van a realizar.
- Diseñar la estructura final del prototipo a través del software SolidWorks, con el fin de validar y evaluar el funcionamiento del sistema, por medio de simulación térmica y dinámica de los fluidos.

La metodología desarrollada para esta investigación está compuesta por fases definidas a continuación.

En la fase de caracterización, se hará una revisión del estado del arte, exponiendo las investigaciones hechas dentro del campo de estudio de la energía geotérmica somera a nivel regional, nacional e internacional y el marco legal que lo avala. Se realizará un

marco teórico en función de los aspectos importantes para tener en cuenta dentro del estudio de la energía geotérmica, sistemas de climatización e intercambiadores de calor.

Se describirán las variables ambientales y las propiedades físicas del suelo (conductividad, capacidad y difusividad térmica), que modifican los parámetros de diseño del sistema de climatización, así mismo, las características mecánicas, materiales y elementos que componen al intercambiador de calor.

La etapa de cálculos se basará en las consideraciones teóricas y empíricas propuestas en los modelos de análisis térmicos de De Paepe & Janssens y Baehr-Stephan, para sistemas de climatización por geotermia de baja entalpia mediante tubos enterrados (De Paepe & Janssens, 2003).

Las magnitudes que tienen mayor relevancia en los parámetros de diseño son: el flujo másico del aire, la temperatura ambiental máxima y media, la temperatura del aire en la entrada del intercambiador de calor y la temperatura del suelo. El flujo másico del aire se establece por las condiciones de la casa a partir del volumen que ocupan los espacios a climatizar y de las renovaciones por hora requeridas para estos espacios. La temperatura del aire de entrada y la temperatura del suelo son parámetros que dependen de las condiciones ambientales, que son integrados como datos de entrada para el análisis.

Los antecedentes del modelo de De Paepe & Janssens 2002, es la selección de un tamaño considerable de la longitud y del diámetro de la tubería, para lograr una mayor eficiencia en la transferencia de calor y un alto rendimiento térmico. Una vez seleccionados el diámetro y la longitud de los tubos y conociendo las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, etc.), se puede calcular el área de intercambio de calor, la

velocidad del aire y el régimen de flujo. Por último, se obtendrá la temperatura de salida del aire, eficiencia del sistema y la caída de presión. (De Paepe & Janssens, 2003).

Una vez fijada la etapa de cálculos, los resultados obtenidos serán los parámetros elementales para diseñar el sistema de climatización. A través del software de diseño SolidWorks, se plasmarán visualmente todos los elementos, características y estructuras que conforman y componen el intercambiador de calor tierra-aire por medio de elementos de dibujo 3D y su respectiva representación gráfica de los planos 2D.

Por último, con la ayuda del complemento Flow Simulation del Software SolidWorks se hará una simulación CFD por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics, donde, se evaluará el comportamiento y el análisis térmico del fluido (aire), y, se hará la respectiva validación del funcionamiento del prototipo donde se pondrá en evidencia el comportamiento dinámico térmico del modelo propuesto por De Paepe & Janssens.

Esta propuesta de diseño busca implementarse en viviendas residenciales con condiciones ambientales de temperatura mayores a 30 °C, y así, según la conductividad térmica y capacidad calorífica del suelo, temperatura, extensión y condiciones ambientales, lograr sustituir el uso de sistemas de climatización convencionales. Así mismo, tiene la intención de comprender, calcular y analizar el sistema de climatización por geotermia hasta el diseño y simulación del funcionamiento del intercambiador de calor aire-tierra, que cumpla con los requerimientos y exigencias de este. Sin embargo, esta investigación se ve limitada a las condiciones ambientales y topográficas de la región, las cuales son impredecibles y varían según la zona de implementación.

Este proyecto beneficia a aquellas personas interesadas en la implementación de estos sistemas de climatización y busquen promover desarrollo sostenible y medioambiental, personas interesadas en aplicar el proyecto en otras ciudades o municipios con condiciones ambientales y tipográficas similares a las mencionadas en el trabajo, comunidades educativas y personas en general que deseen adquirir conocimientos sobre los temas de interés presentes en el proyecto.

1. Capítulo 1: Marco Teórico

El capítulo expuesto a continuación muestra los aspectos asociados a las investigaciones y tecnologías existentes. Inicia con los antecedentes del objeto de investigación del presente proyecto, seguido por el marco teórico que define las características, conceptos, aplicación y clasificación de la energía geotérmica, el proceso de intercambio de calor tierra-aire, definición e ilustración del sistema de climatización por ductos subterráneos; así como sus componentes y los tipos de instalaciones posibles.

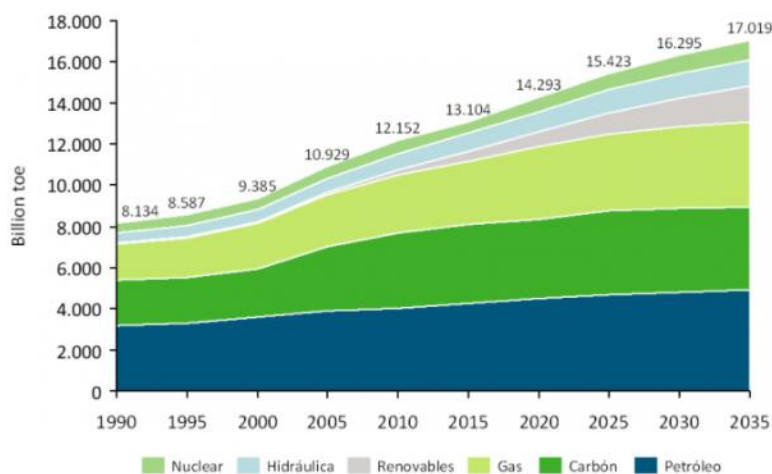
1.1 Antecedentes

A lo largo de los años, los avances científicos y tecnológicos se han desarrollado creando oportunidades de mejora para las personas, además de priorizar el uso de la energía eléctrica. El planeta Tierra presenta una situación energética difícil: por un lado, la demanda de energía va en aumento y por otro lado, las fuentes actuales en su mayoría tienen recursos limitados y su uso tiene consecuencias ambientalmente indeseables. La población y el crecimiento económico en todo el mundo están provocando que consumamos más energía, y las formas tradicionales en que la producimos, principalmente a través de combustibles fósiles, tienen impactos significativos (negativos) a nivel mundial en la vida humana (Pinilla Rodríguez, 2019).

El modelo energético actual se caracteriza por un consumo energético en constante crecimiento, basado en recursos finitos, principalmente combustibles fósiles. Según las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la demanda mundial de energía primaria aumentará un 30% hasta el año 2040, manteniendo una cuota

significativa de los combustibles fósiles en el consumo total. El carbón, el gas natural y el petróleo supondrán el 80% de consumo de energía para el 2040 (Energía y sociedad, 2020), como se puede ver en la Figura 1-1.

Figura 1-1. Evolución de la energía mundial primaria desde 1990 hasta 2035 expresada en unidades de energía llamadas Btoe



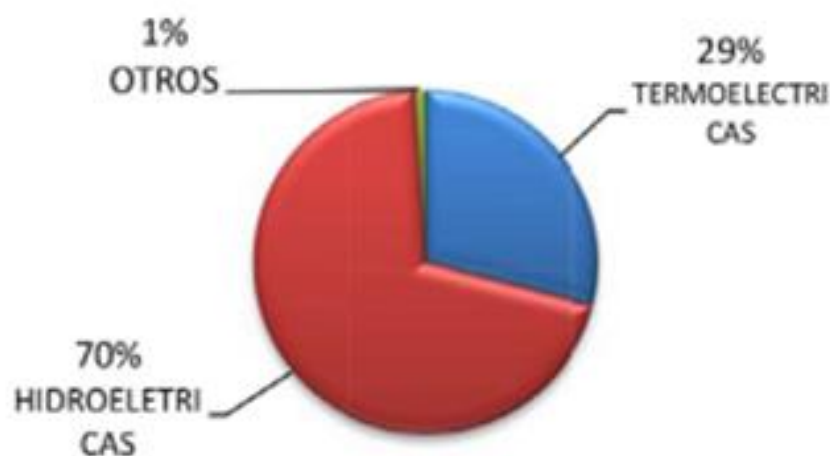
Fuente: Energía y sociedad, 2020

El desafío actual en el mundo es implementar energías limpias, con el objetivo de mitigar el cambio climático y generar un desarrollo sostenible. Esta necesidad ha incentivado la búsqueda de nuevas tecnologías para la obtención de energías renovables, entre ellas la solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, geotérmica, entre otras (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

De esta forma, el sector energético ha hecho una contribución positiva y creciente a la balanza comercial de Colombia, sin embargo, el Plan Nacional de Energía (PEN) aborda explícitamente este tema al plantear propuestas de diversificación de la oferta energética mediante el uso de fuentes no habituales de energía (Gutierrez Soleibe, 2021). En la Figura 1-2, se observa las principales fuentes de producción de energía en el país siendo el 29%

de centrales termoeléctricas, el 70% de centrales hidroeléctricas y 1% de otras fuentes de producción (Mateus Valencia, 2016).

Figura 1-2. Producción de energía en Colombia



Fuente: Crisis energética en Colombia, Mateus Valencia, 2016.

En un estudio técnico realizado por La Unidad de Planeación Minero-Energética UPME, presenta una proyección anual de demanda de energía eléctrica y gas natural para el periodo 2021-2035, cuyo fin es proveer información estadística que sirva de soporte al momento de tomar decisiones de inversión en la infraestructura de abastecimiento energético y facilite la construcción de proyectos en el país. El consumo de energía eléctrica en 2020 fue de 70.422 GWh-año, que frente a los 71.925 GWh-año registrados en el 2019 representa una reducción del 2% anual. Si bien, parece un impacto marginal, es preciso mencionar que la demanda de energía eléctrica en Colombia no registraba crecimiento negativo desde el año 2000 (UPME, 2020). En la Tabla 1-1 encontramos la proyección de la demanda de energía eléctrica en el país por parte de UPME, dicha proyección se realiza para el año 2021 hasta el año 2035 con consumo de GWh por año, donde se evidencia la tendencia creciente del consumo energético en Colombia.

Tabla 1-1. Demanda de energía eléctrica SIN en Colombia (GWh-año)

	Demanda Energía Eléctrica SIN (GWh-año)		
	Esc. Medio	Lím. Alto	Lím. Bajo
2021	71.678	72.881	70.484
2022	73.092	75.193	71.006
2023	74.638	76.784	72.507
2024	76.379	78.572	74.202
2025	78.155	80.402	75.925
2026	79.983	82.280	77.702
2027	81.944	84.297	79.608
2028	83.922	86.333	81.529
2029	85.882	88.350	83.432
2030	87.933	90.459	85.425
2031	90.245	92.837	87.672
2032	92.508	95.166	89.870
2033	94.809	97.533	92.104
2034	97.417	100.215	94.639
2035	99.984	102.857	97.131

Fuente: Demanda y eficiencia energética, UPME, 2020.

La transformación del sector energético en general y del eléctrico en particular, impulsada por las energías renovables, es objeto de análisis específico por parte de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), que pronostica que para el año 2040, cerca del 60% de la electricidad generada será de origen renovable, con una parte importante de la producción eólica y solar fotovoltaica. (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017). Según la AIE, se necesitan cambios estructurales en el diseño y operación de los sistemas de energía.

Aunque algunos estudios no se refieren a la energía geotérmica como una oportunidad para satisfacer las necesidades energéticas actuales y futuras del mundo, no se puede descartar en la primera oportunidad, ya que tiene unas ventajas como el respeto por el medio ambiente, el hecho de que es renovables hace fuerte la inversión del proceso de

estudio e instalación de los proyectos, ya que la energía es gratuita (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

1.2 Energías renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales (Spiegeler & Cifuentes, 2016). Según el informe de Bruntland de 1987, las energías renovables son un potencial sin aprovechar. En teoría, las fuentes de energía renovable podrían, proporcionar entre 10 a 13 TW anualmente, es decir, el equivalente del actual consumo mundial de energía. En la actualidad proporcionan anualmente más o menos 2 TW, es decir, el 21 por ciento, aproximadamente, de la energía consumida en el mundo entero, proporción de la cual el 15 por ciento corresponde a la biomasa y el 6 por ciento a la energía hidroeléctrica (Bruntland, 1987).

Los sistemas de energía renovable aún se encuentran en una etapa relativamente temprana de desarrollo, pero proporciona al planeta Tierra fuentes potencialmente enormes de energía primaria, que tiene una duración ilimitada y está disponible en esta forma o de otra manera en cualquier país. Sin embargo, lograr el máximo rendimiento requerirá el compromiso total y sostenido con la investigación y el perfeccionamiento continuo (Bruntland, 1987). La mayor parte de la energía renovable proviene directa o indirectamente del sol. La energía solar se puede utilizar directamente para calentar e iluminar edificios, generar electricidad, calentar agua, enfriar la energía solar y diversos usos comerciales e industriales. El calor del sol también alimenta los vientos, cuya energía

es capturada por turbinas eólicas. El viento y el calor del sol evaporan el agua. Cuando este vapor de agua se convierte en lluvia o nieve y fluye a lo largo de un río o arroyo, su energía puede ser capturada por energía hidroeléctrica (Badii, Guillen, & Abreu, 2016). Entre de las energías renovables y la búsqueda de nuevas tecnologías para fuentes de energía renovables, podemos encontrar la eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, geotérmica, biomasa y biocarburante. En la Tabla 1-2 podemos observar algunos recursos renovables, la tecnología que utilizan y el campo de aplicación.

Tabla 1-2. Aplicación de las tecnologías de los recursos renovables

RECURSO RENOVABLE	TECNOLOGÍA	APLICACIÓN
SOLAR	Fotovoltaica	Electricidad
	Térmica	Calor, Electricidad
EÓLICA	Generación eléctrica	Electricidad
	Fuerza Motriz	Fuerza motriz
BIOMASA	Combustión	Calor, Electricidad
	Pirólisis	Combustible
	Gasificación	Gas combustible
	Digestión anaeróbica	Biogas combustible
HIDRAULICA	Centrales hidroeléctricas	Electricidad
GEOTÉRMICA	Generación eléctrica	Electricidad
	Climatización	Calor, Recreación, Confort

Fuente: Autor, 2022.

La tecnología geotérmica se ha utilizado para generar electricidad, calefacción y refrigeración. Esta variedad de aplicaciones permite utilizarla en todos los países con o sin estaciones climáticas. Evita el consumo de energía fósil y con ello un mayor daño a la capa de ozono (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

1.3 Energía geotérmica

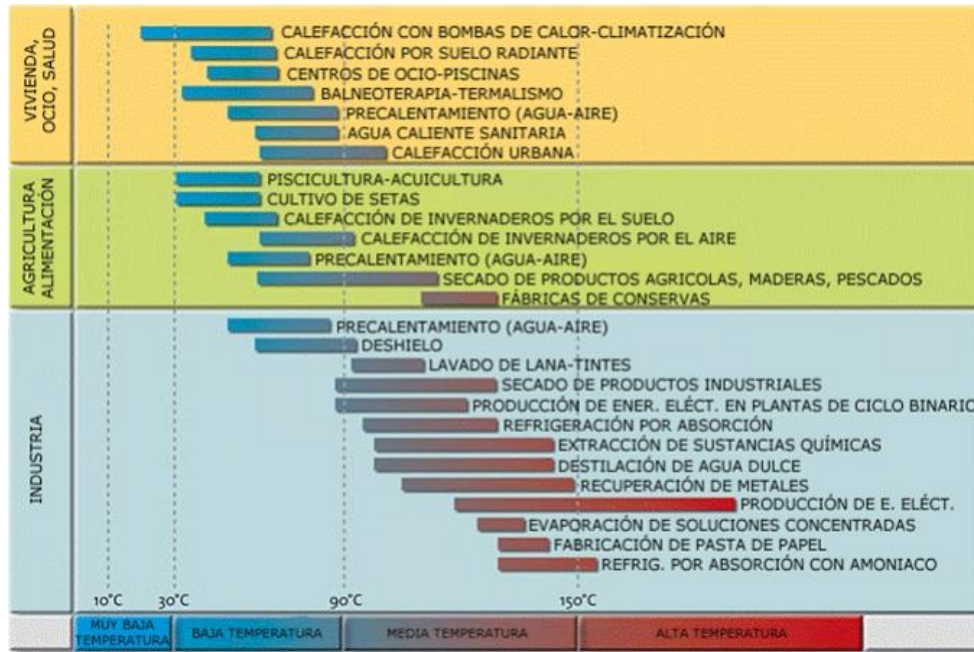
La energía geotérmica es una fuente de energía renovable, es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la Tierra. Esta energía ha existido desde la

formación del planeta, hace unos 4.500 millones de años, y ha estado atrapada allí desde que la corteza terrestre se endureció hace millones de años.

Este calor, más el calor generado por los fenómenos térmicos que ocurren dentro de la Tierra y el calor producido por la desintegración de los isótopos radiactivos contenidos en la roca, produce un flujo de calor creciente. Además, la radiación solar, el viento y el agua de lluvia han penetrado a profundidad en el suelo y juntos son irradiados a la atmósfera (Beatriz Yolanda, 2012).

Las posibles aplicaciones de un fluido geotérmico dependen de su poder calorífico, o por su definición, de su entalpía. La entalpía es la cantidad de energía térmica que un líquido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008) En la Figura 1-3 se pueden observar los principales usos de la energía geotérmica en la industrial, agricultura y en las viviendas.

Figura 1-3. Principales aplicaciones de las tecnologías geotérmicas



Fuente: Geothermie-Perspectives de l'ADEME en BRGM, en Guillermo Llopis Trillo & Vicente Rodrigo Angelo, 2008

En la Tabla 1-3 se clasifica la energía geotérmica por el tipo de terreno y aplicación.

Tabla 1-3. Clasificación por Entalpía

Tipo de Yacimiento	Tipo de Terreno	Rango de Temperatura	Aplicación
Muy baja Entalpía	Subsuelo con o sin agua	$T < 25^{\circ}\text{C}$	Climatización
	Aguas subterráneas	$10^{\circ}\text{C} < T < 22^{\circ}\text{C}$	
Baja Entalpía	Aguas termales	$22^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$	Balnearios
	Zonas volcánicas	$90^{\circ}\text{C} > T$	Calor de distrito
	Sedimentos profundos		
Media Entalpía		$90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	Electricidad, Ciclos Binarios
Alta Entalpía		$T > 150^{\circ}\text{C}$	Electricidad

Fuente: Autor, 2022. A partir de datos recolectados de Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008.

De manera similar, las diferentes clasificaciones de la energía geotérmica en términos de entalpía, según el rango de variación de la temperatura y el rango de profundidades desde la corteza terrestre hasta la región en la que se presenta, según definición de (Rodríguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018).

- Alta entalpía, alta temperatura: $T > 150\text{ °C}$

Son depósitos de agua atrapada a elevadas temperaturas en zonas de actividad magmática que sirven como fuente calorífica. Se encuentran entre 1.500 a 3.000 metros de profundidad.

- Media entalpía, medianas temperaturas: $90\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$

Se encuentran yacimientos en valles sedimentarios localizados entre los 1.000 y 3.000 metros. Las grietas del suelo permiten que el agua caliente ascienda hasta la superficie, y así, formar las fuentes termales.

- Baja entalpía, bajas temperaturas: $25\text{ °C} < T < 90\text{ °C}$
- Muy baja entalpía, muy bajas temperatura: $T < 25\text{ °C}$

Las clasificaciones de baja y muy baja entalpía son yacimientos que se encuentran en niveles cercanos a la superficie terrestre, estos aprovechan la variación de temperatura entre el terreno y su superficie.

Los recursos energéticos renovables, permiten obtener energía de diversas maneras, tales como energía mecánica, eléctrica, química y/o calórica, y, además, algunas de estas energías renovables, puntualmente, la energía geotérmica somera o de baja entalpía, permiten disminuir el consumo de otros tipos de energía, es decir, que hacen más eficiente el consumo de electricidad (Rodríguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018).

Todas las masas de tierra formadas en el planeta son, al menos, capaces de almacenar recursos geotérmicos de muy baja temperatura para su uso, dependiendo de la composición del suelo de la región; la conductividad térmica y capacidad calorífica, para ser más eficientes (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008). La Figura 1-4 muestra las regiones del mundo donde es más probable encontrar recursos geotérmicos de alta, baja y muy baja entalpía.

Figura 1-4. Recursos geotérmicos globales



Fuente: Geothermie-Perspectives de l'ADEME en BRGM, en Guillermo Llopis Trillo & Vicente Rodrigo Angelo, 2008

Dentro de las definiciones relacionadas a la geotermia, destacamos la energía geotérmica mayor entalpía, ya que esta es la energía más indagada y por lo tanto más utilizada en todo el mundo. Seguidamente se describirá para reforzar la idea de energía geotérmica y distinguir entre las dos clasificaciones más utilizadas: alta o baja entalpía, para finalmente dedicarse a la investigación, cálculo y diseño de este proyecto, por su facilidad de explotación y aplicabilidad en el campo de la climatización, corresponden a la rama de la geotermia de muy baja entalpía.

1.3.1 Alta Entalpía

En algunas zonas del planeta Tierra, es fácil ver que, dependiendo de la topografía, que esta fuente de calor afecta a grandes masas de tierra o charcos de agua. En algunas ocasiones el agua empieza a hervir y sube a la superficie en forma de chorros de vapor. En otros casos, el calor se almacena en la tierra y en las rocas, y para extraerlo se inyectan toneladas de agua que se evaporan y regresan a la superficie con altos niveles de energía (Santilli, 2014).

La presencia de volcanes, aguas termales, y otros fenómenos térmicos debieron dar a nuestros antepasados la idea de que ciertas zonas del interior de la tierra son calientes. Sin embargo, fue recién entre los siglos XVI y XVII, cuando se excavaron los primeros yacimientos a unos cientos de metros bajo tierra, que se dedujo que, por simple sentido físico, la temperatura del terreno aumentaba con la profundidad (Santilli, 2014).

El calor continuo se produce por la desintegración de isótopos radioactivos de vida prolongada de uranio (U238, U235), torio (Th232) y potasio (K40), presentes en la tierra. Además del calor radiante, en proporciones inciertas, existen otras fuentes potenciales de calor, como es la energía primordial que ha existido desde la formación del planeta Tierra. Los recursos geotérmicos de alta entalpía se pueden explotar utilizando directamente calor para calefacción o generando de electricidad a partir del uso de vapor en turbinas. En el caso de la generación de energía eléctrica, las instalaciones son similares a las de las centrales térmicas, con la diferencia de que el vapor no se genera a partir de la combustión de carbón, del petróleo o del gas, sino que se obtiene directamente de la energía geotérmica (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).

Hoy en día, existen plantas de energía geotérmica en todos los continentes donde hay depósitos de agua caliente y/o de vapor. A través de perforaciones de gran profundidad, se encuentra cerca de 4,5 GWt (Giga Watts térmicos), lo que ayuda a tener un ambiente limpio al reemplazar los hidrocarburos con la fuente principal, sin embargo, solo se aprovecha una pequeña parte del recurso.

1.3.2 Muy baja Entalpía

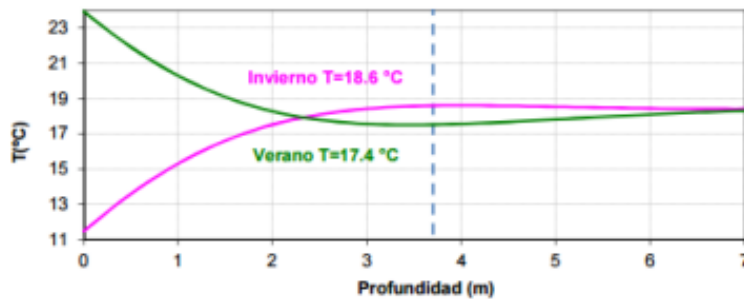
Aproximadamente toda la corteza terrestre está formada por depósitos geotérmicos a temperaturas muy bajas, por debajo de los 25° C, a excepción de las zonas con agua marina o continental.

El calor almacenado en el subsuelo superficial que se encuentra a bajas temperaturas en suelos, rocas y aguas subterráneas puede denominarse energía geotérmica superficial o somera, energía de baja entalpía o geotérmica solar. En cualquier punto de la superficie del planeta Tierra se acumula calor en las capas exteriores de la tierra, a varios metros profundidad, que puede ser aprovechado para la climatización de viviendas y edificios gracias a las bombas de calor geotérmicas (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).

La energía geotérmica de baja entalpía centra sus aplicaciones en la capacidad del subsuelo para acumular calor y mantener una temperatura estable durante todo el año. Desde una profundidad de 1 m, la diferencia de temperatura entre el aire y la tierra se vuelve notable. Cuando bajas, la temperatura es más estable, en la Figura 1-5 se evidencia,

que, a mayor profundidad la temperatura se vuelve constante tanto en invierno como en el verano.

Figura 1-5. Temperatura del suelo en relación con la profundidad



Fuente: Rodriguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018

Las instalaciones geotérmicas superficiales o someras se denominan así a todos los métodos que incorporan 3 componentes principales en su funcionamiento: primero, un intercambiador de calor asociado a la superficie terrestre o con una fuente de agua subterránea o superficial, bombas de calor geotérmicas y sistemas de distribución (Gutierrez Soleibe, 2021). Existen diferentes formas y métodos para extraer la energía del terreno a través de intercambiadores de calor que se conectan a un sistema de intercambiador geotérmico (Marc De Val, 2014).

La superficie exterior del suelo intercambia calor con la atmósfera, lo que, a su vez, causa variaciones de temperatura hasta una profundidad 0 a 0,5 metros, por esta razón la instalación de intercambiadores de calor aire-tierra se recomienda realizarse a más de 1 metro de profundidad. Dependiendo del tipo de suelo, después de los dos metros de profundidad la temperatura empieza a ganar estabilidad, logrando temperaturas entre 15-21 °C. El tema clave del buen funcionamiento de los sistemas geotérmicos radica en la

diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura del elemento. En las instalaciones típicas de veranos, el aire exterior debe estar alrededor de los 30-35° C y la temperatura debe llegar alrededor de los 20-24° C (Marc De Val, 2014).

1.4 Características del terreno

El tipo de suelo y la topografía tienen una influencia importante al momento de diseñar e instalar un intercambiador de calor, debido a sus características únicas de transferencia de calor (Beatriz Yolanda, 2012). Los sistemas de acondicionamiento térmico tierra-aire, como lo son los conductos enterrados, son óptimos porque pueden aprovechar la inercia térmica diaria y estacional del subsuelo. Es decir, aprovecha las propiedades del suelo para mantener una temperatura interior estable a pesar de los cambios y fluctuaciones exteriores.

A pesar de la amplitud publicada de la disponibilidad de esta energía, su rendimiento puede variar ampliamente, dependiendo de temperatura que disponga. Es claro que el comportamiento de las masas terrestres con respecto a la transferencia de calor a través de ellas y su capacidad de almacenamiento regirán en gran medida la eficiencia de este tipo uso energético (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019).

Las propiedades térmicas del suelo afectan el contenido volumétrico de agua del suelo, el porcentaje de volumen del aire y el porcentaje de volumen de los sólidos en el suelo, así como su relación con la profundidad de instalación de la tubería. La transferencia de calor en un elemento, como el suelo, está determinada por dos

propiedades: la conductividad térmica y la capacidad calorífica, que son la base principal para el funcionamiento de los tubos enterrados.

1.4.1 Conductividad térmica

Las propiedades internas del suelo se relacionan con su capacidad para conducir calor y con el movimiento de la energía térmica a través del suelo. El calor se mueve de una región de alta temperatura a una región de temperatura más fría, distribuida para alcanzar el equilibrio, donde el calor se distribuye uniformemente por toda la sustancia. Cuando la conductividad térmica del suelo es alta, el cambio en la temperatura de la superficie es menor y también aumenta con la humedad. Por lo tanto, la arcilla y la humedad permiten una mejor transferencia de calor que el suelo duro. Los suelos rocosos, arenosos o volcánicos, por el tamaño de las partículas que los componen, crean vacíos que producen un menor intercambio de calor. (Cabezas, 2012).

Según la ley de Fourier, la conductividad térmica se puede expresar como la cantidad de calor que atraviesa el material en un 1 metro de espesor en dirección x, como consecuencia de una diferencia de 1 grado entre los extremos opuestos. Se expresa en W/mK y se define con la siguiente formula:

$$K = \frac{\frac{Q}{A}}{\frac{\Delta T}{\Delta x}} \quad (1.1)$$

Donde K es la conductividad térmica, Q es la cantidad de calor y A es el área de sección transversal. Causa una diferencia de temperatura ΔT en una distancia de Δx .

1.4.2 Capacidad calorífica

Es la capacidad que tiene el suelo para almacenar calor si la temperatura cambia, pero sin cambiar de fase. En otras palabras, es la relación existente entre la cantidad de calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura que este ocasiona, a su vez indica la cantidad de calor que es capaz de almacenar un material cuando su temperatura es aumentada, en este caso, por el ICTA (Gutierrez Soleibe, 2021). Se expresa en J/m^3K y se define con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (1.2)$$

La capacidad térmica es C , ΔQ es la cantidad de calor necesario para hacer variar la temperatura ΔT .

Considerando estas dos propiedades, se puede observar que, a cierta profundidad, el proceso de infiltración y enfriamiento del suelo se produce lentamente. En la Tabla 1-4 se establecen los diferentes tipos de suelos según los valores típicos de coeficientes de conductividad térmica y capacidad calorífica.

Tabla 1-4. Propiedades de transferencia de calor para tipos de suelos

Material	Conductividad Térmica ($J^{\circ}C/s$)	Capacidad Calorífica ($J^{\circ}/cm^3/s$)
Suelos arenoso húmedo	0.017	1.68
Arena	0.003	1.26
Arcilla	0.0025	1.26
Orgánico	0.0126	2.39
Nieve compacta	0.0029	0.92

Conductividad térmica y capacidad calorífica para diferentes tipos de suelos.

Fuente: (Cabezas, 2012).

1.5 Intercambiadores de calor

En este punto, sabemos que tenemos una fuente de energía renovable que está disponible para todos y durante todo el año. Una de las formas de aprovechar esto es instalar intercambiadores de calor en el suelo, por los que circulará el líquido o el gas, normalmente agua con anticongelante, en contacto con la capa subterránea de la superficie de la tierra, que adquirirá o transmitirá energía debido a la diferencia de temperatura entre el líquido y el terreno (Girodgeotermia, 2008) (Santilli, 2014). Un intercambiador de calor es un dispositivo que transfiere calor continuamente de un medio a otro. Los mecanismos de transferencia de calor en cualquier medio son: conducción, convección y radiación (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).

- **Conducción:** es la transferencia de calor a través de un medio a través de interacciones entre partículas vecinas. Puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases, aunque es característico de los sólidos, ya que en los gases y líquidos la convección siempre ocurrirá simultáneamente.

- **Convección:** es una forma de transferir energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Consiste en los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido causados por la diferencia en su densidad.

- **Radiación:** es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, que es el resultado de un cambio en la configuración electrónica de un átomo o molécula.

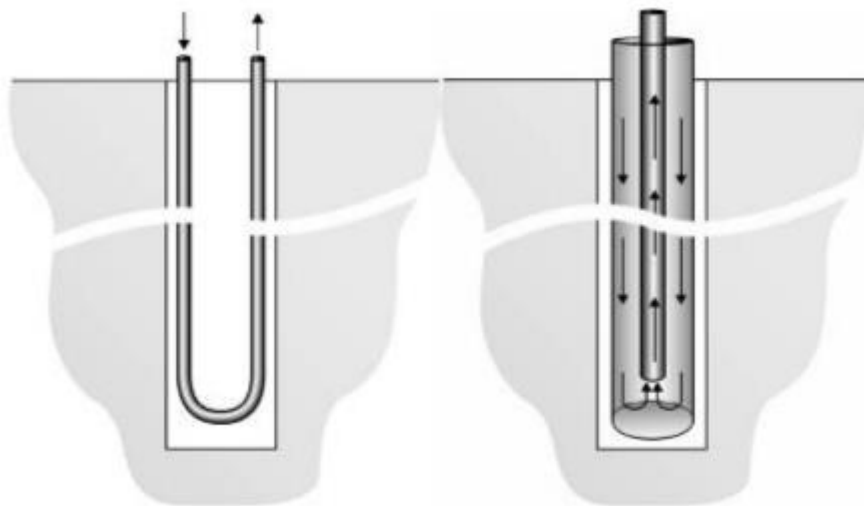
Existen diferentes configuraciones para los sistemas de climatización geotérmicos, que veremos a continuación. Para el desarrollo del proyecto se hace énfasis en los

intercambiadores de calor aire-tierra con implementación de estos en horizontal bajo las premisas del sistema de pozos provenzales.

1.5.1 Captación con configuración vertical

Consiste en realizar uno o varias perforaciones en los que se introducirán los colectores de energía. Su longitud varía entre los 50 m y los 200 m. Tienen la ventaja de ocupar poco espacio y ser estables a altas temperaturas. Por el contrario, su implementación es más costosa que otros sistemas de recolección (Santilli, 2014) (Girodgeomia, 2008). Para las instalaciones verticales, la configuración de los ductos es en forma de U o coaxiales, aplicada en múltiples perforaciones, tal como observamos en la Figura 1-6.

Figura 1-6. Representación gráfica de las instalaciones geotérmicas acopladas al subsuelo

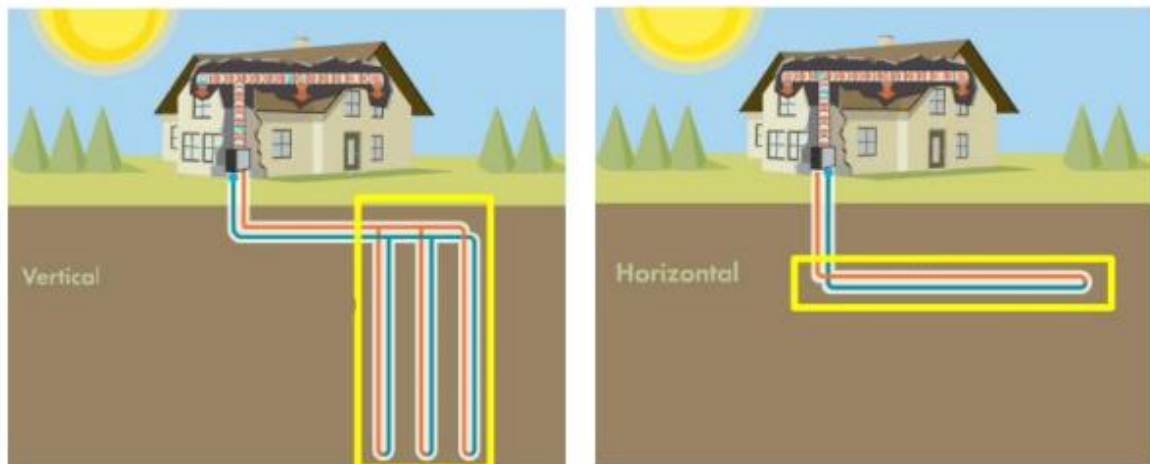


Fuente: Configuración de los intercambiadores verticales: A la izquierda tubería en U y a la derecha tubería coaxial, respectivamente, Gutierrez Soleibe, 2021.

1.5.2 Captación con configuración horizontal

La captación horizontal consiste en realizar una serie de zanjas en las que se ubican los colectores de energía. Su profundidad es de aproximadamente 0,6 m a 1,5 m. Este es un sistema más económico que el sistema de perforación, sin embargo, tiene la desventaja de requerir una gran área de terreno, en la cual no será posible cultivar plantas con raíces profundas que puedan perturbar los colectores de energía en el futuro o para construir plataformas o cimientos (Santilli, 2014) (Girodgeoenergía, 2008). Podemos observar en la Figura 1-7 los esquemas de instalación según sea la captación del calor por energía geotérmica.

Figura 1-7. Esquema de instalaciones geotérmicas acopladas al subsuelo



A la izquierda, el esquema instalación geotérmico de captación vertical. A la derecha, el esquema de instalación geotérmico de captación horizontal.

Fuente: Gutierrez Soleibe, 2021 en (Rivas-cruz et al., 2018).

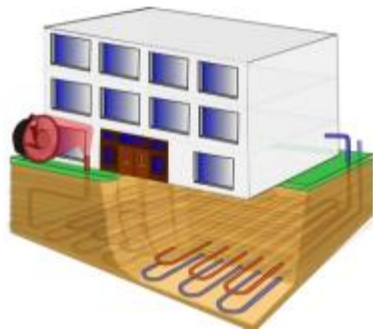
1.5.3 Pozos canadienses o provenzales

A diferencia de los dos métodos anteriores (sistema cerrado), este método utiliza aire atmosférico como fluido de intercambio de energía (sistema abierto), en lugar de utilizar un líquido.

Los pozos canadienses se basan en el uso de la energía térmica del suelo para regular la temperatura del aire, para ventilar edificios, reduciendo así el consumo de energía eléctrica debido a la utilización sistemas de aire acondicionado (ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012).

En este tipo de sistema, el aire ingresa al pozo a través de una entrada de aire debidamente protegida, gracias al inyector, se distribuye en las estancias del edificio a climatizar, asegurando el suministro de aire fresco (Escuer J. Brunat, 2008), en la Figura 1-8, se observa una representación gráfica de la instalación del sistema climatización a partir de tubos enterrados.

Figura 1-8. Sistema de climatización utilizando tubos enterrados



Fuente: ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012.

La técnica que se aplica a la climatización por pozos provenzales o canadienses, a través de tubos enterrados es conocida también alrededor del mundo como intercambiadores de calor tierra-aire, cuyo fin es reducir el uso de aire acondicionado y así lograr una disminución en el consumo de energía en el edificio (ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012).

En Francia, se utilizaba esta técnica para refrigerar las casas, al ingresar el aire exterior, de manera forzada dentro de los ductos, los cuales se encontraban a una temperatura menor. El mismo método se usó en Canadá, pero con el objetivo inverso, es decir, calefaccionar la edificación, cuando el aire exterior se encontraba a una temperatura menor a la de las tuberías bajo la superficie del suelo. De allí dan lugar su denominación (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).

Una variable importante de este mecanismo es la profundidad a la cual se debe enterrar la tubería, se ha tenido en cuenta que una profundidad de 2,5 metros es una medida razonable, esto con el objetivo de reducir los costos de instalación (ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012). De lo anterior, el ICTA se puede usar también durante todo el año, para climatizar en verano e invierno, siempre y cuando exista una diferencia de temperatura entre el ambiente externo y el método de tuberías subterráneas para intercambio de calor. El uso de bombas de calor geotérmicas en este tipo de configuraciones (sistema abierto) es opcional, si se tiene un espacio muy amplio y si se desea mejorar el rendimiento, es allí, donde se puede aplicar la teoría de las bombas geotérmica para calefacción o refrigeración.

Originalmente el pozo provenzal fue una canalización en piedra enterrada en una ladera, utilizado para dirigir la convección natural, un flujo de aire desde la boca exterior

por medio de un conducto al cuerpo principal del edificio tradicional. En invierno, la tierra calienta este aire entrante mientras que en verano lo enfría gracias a la inercia térmica del suelo. Un sistema sencillo e ineficiente, pero que, en un edificio tradicional provenzal, donde la inercia térmica es alta debido a la existencia de muros gruesos y pocas aberturas, el resultado merece aún más la pena (Escuer J. Brunat, 2008).

Se han identificado tres configuraciones diferentes de redes de tuberías enterradas: bloque Techelmann (bloque - rejilla), Techelmann distribuido (malla) y aislamiento directo (anillo). Estos patrones de distribución difieren según el número y la distribución de los tubos horizontales (REHAU Unlimited Polymer Solutions, 2016).

- **Directos aislados (anillo)**

Su mayor aplicación es en viviendas unifamiliares y/o pequeñas obras de construcción. Se adopta este diseño porque es rentable y rentable al usar zanjas existentes en lugar de volver a excavar. La figura 19 muestra la falla del sistema según REHAU, 2016

Figura 1-9. Distribución directo aislado



Fuente: REHAU, 2016.

Su instalación consta de uno o dos conductos, que son conducidos a la cámara central, donde el ventilador impulsa todo el sistema y que a su vez se conecta directamente a la torre de extracción.

- **Distribución Techelmann (rejilla)**

Se utiliza cuando no se puede lograr una distribución de tipo aislado porque la longitud total de las tuberías es muy larga por mayor caudal, mejora y confort térmico. Este tipo de sistemas se ubican en grandes edificios, por lo que es muy importante tener en cuenta que las galerías de entrada y salida de aire deben tener drenaje (por percolación al suelo o por condensación de tuberías). La Figura 1-10 expone la representación del sistema de climatización por intercambiador de calor tierra-aire.

Figura 1-10. Distribución techelmann



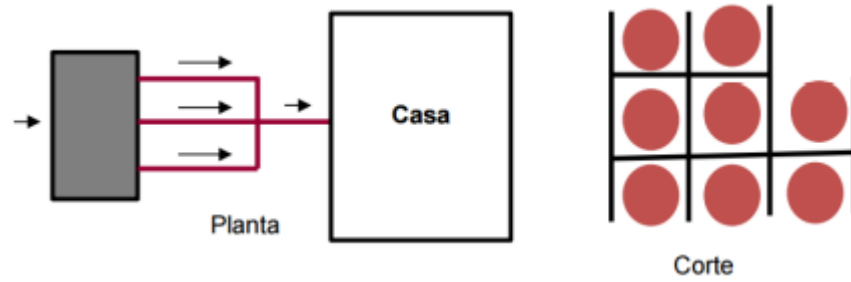
Fuente: REHAU, 2016.

- **Bloque Techelmann (bloque – rejilla)**

Este sistema combina los dos métodos descritos anteriormente, pero los implementa en un espacio limitado; Por ello, su sección se construye su sección como un bloque con varias capas de tuberías. A la hora de diseñar este tipo de

sistemas es de suma importancia analizar la inercia térmica de todo el bloque ya que un mal diseño no permitirá un adecuado intercambio de calor. Figura 1-11.

Figura 1-11. Distribución bloque techelmann



Fuente: REHAU, 2016.

2. Capítulo 2: Estado del Arte

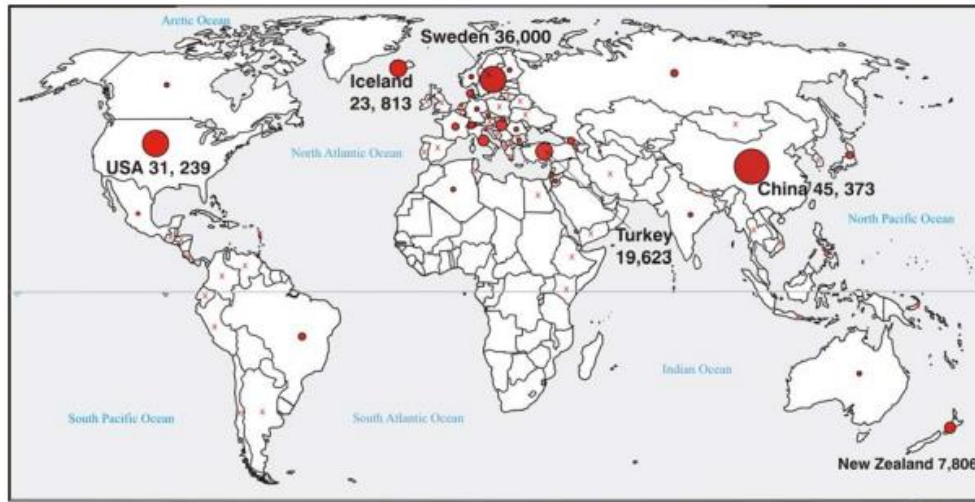
En el capítulo dos se exponen las investigaciones y estudios realizados a nivel informativo, técnico y tecnológico, los cuales aportan para el desarrollo y conceptualización del prototipo de diseño propuesto en el presente proyecto.

2.1 Estado del arte

La conversión de calor en electricidad es el uso óptimo de un recurso geotérmico. Hasta ahora, 24 países aprovechan la electricidad de los sistemas geotérmicos, con un total instalado de capacidad de unos 8932 MWe. Las aguas geotérmicas gastadas de las turbinas de vapor son descargadas en el subsuelo a una distancia de los depósitos del que se derivaron, dependiendo del entorno geológico, la calidad del agua, el entorno local y los reglamentos estatales.

Los recursos geotérmicos a baja temperatura son omnipresentes y cada vez más son utilizados en el mundo como se observa en la Figura 2-1. De 2000 a 2005, el número de países que utilizan los recursos geotérmicos aumentaron de 58 a 72, con la duplicación de la capacidad instalada a 27.825 MWt. La energía térmica utilizada aumentó un 40% en el mismo lapso, para 261.418 TJ/año /72.622 GWh/año) (Thain, Reyes, & Hunt, 2006).

Figura 2-1. Países que utilizan recursos geotérmicos a baja temperatura



Los cinco usuarios principales son China, Suecia, EE. UU, Islandia y Turquía. Los consumidores con >1000 TJ/año se indican con círculos sólidos y aquellos con <1000 TJ/año por una X.

Fuente: Thain, Reyes, & Hunt, 2006.

2.1.1 Estado actual de la energía geotérmica en Colombia

En el estudio de Geraldyn Arias Marín y Ana María Acevedo Sánchez encontramos el estado actual de la producción de energía geotérmica en Colombia, que es un estudio que recorre el mundo en busca de proyectos de desarrollo geotérmico, y el nivel de progresión energética, para establecer cómo los gobiernos se han comprometido a cumplir con los compromisos pactos en Río y Kioto. Cambiando el uso de recursos fósiles para producir energía, se puede lograr una disminución de los efectos invernaderos; esto, produciendo energías limpias para el medio ambiente como la energía geotérmica, las

cuales representan incluso menores costos, ya que es gratuita y comercial (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

Realizaron un estudio cualitativo, con enfoque descriptivo, preguntando por el estado de los proyectos geotérmicos en el país, con el fin de establecer el nivel de desarrollo y con ello, centrarse en las dos cosas más importantes para el futuro del país en el ámbito energético: Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño – Chiles – Cerro Negro, en 2015, el cual es un proyecto que impacta a los países de Ecuador y Colombia mediante un par de taludes volcánicos de Chile, ubicados en la frontera; Proyecto Nereidas, ubicado cerca del Nevado del Ruiz, el cual ha sido soportado por empresas como BID, ISAGEN, UNE y CHEC (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

Colombia cuenta con considerables fuentes de recursos geotérmicos ubicados principalmente en la cordillera central, por lo que, desde el siglo anterior se han efectuado estudios que permitan determinar los sitios óptimos para la utilización y producción de energía geotérmica. Con base en lo anterior se tiene: el Nevado del Ruiz para el proyecto Nereida; volcanes Chiles y Cerro Negro, frontera con Ecuador, Proyecto binacional Tufiño – Chiles – Cerro Negro; el volcán Azufral, ubicado en el sur del país; región nororiental de Boyacá, municipio de Paipa y zonas aledañas; volcán Nevado de Santa Isabel, también ubicado en la cordillera central (Acevedo Sánchez & Arias Marín, 2017).

Gracias a la investigación de los autores, podemos establecer el estado actual de la energía geotérmica en Colombia, así como los marcos legales que la rigen, que la definen y supervisa. Se evidencia poco aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el país

2.1.2 Investigaciones y aportes al tema a nivel nacional

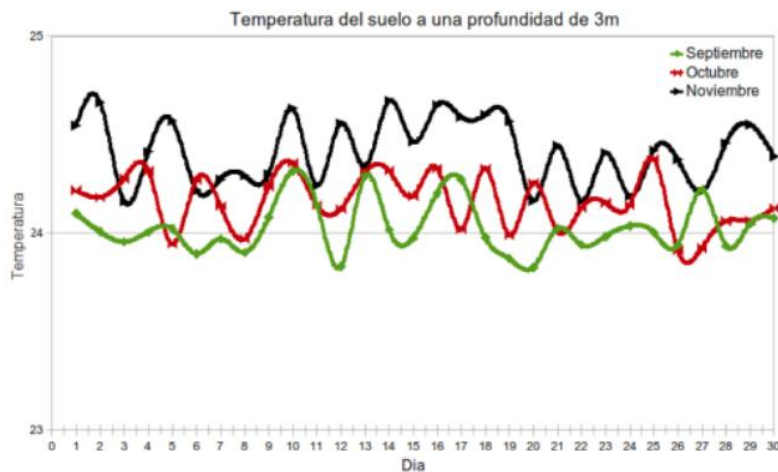
Existe en la región del Huila un proyecto de caracterización de los principios de los pozos provenzales para el municipio del Juncal, demostrando como varían las temperaturas a diferentes profundidades, a su vez, se toman valores experimentales de temperatura para aplicarlos en cálculos de transferencia de calor, con el objetivo de proponer al lector el uso de tecnologías sostenibles, con su aporte de ingeniería se espera generar desarrollo a la zona de estudio en cuanto a climatización en las edificaciones. Se espera dar solución al planteamiento del problema, la cual, son las elevadas temperaturas en la zona y con su investigación se pretende implementar este sistema con el fin de generar temperaturas de confort dentro de las viviendas. Gracias a la investigación de los autores, se solidifican los parámetros de diseño de pozos provenzales y proponen al lector el uso tecnologías sostenibles. Con su investigación “Pozos provenzales para aplicación en climatización tipo confort” (Losada Gomez & Charry Celis, 2016).

El trabajo de los autores titulado “Diseño de la automatización y control de un sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados para espacios interiores en el Edificio de Ingeniería Eléctrica II”, avalado por el equipo GISEL de E3T, fue el primer intento de establecer un sistema forzado de ventilación natural adaptativa ventilación para el edificio. Se efectuó un análisis de las especificaciones necesarias con las que se puede adoptar y materializar un sistema de este tipo, en el edificio de Ingeniería Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander, con el propósito de determinar cuáles eran los parámetros mínimos requeridos, adaptados a las condiciones climáticas de la ciudad de Bucaramanga, para su funcionamiento (ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012).

Se muestra una solución sencilla y óptima, mediante la aplicación del concepto de eficiencia energética, al problema de consumo excesivo de energía eléctrica para el uso de espacios interiores, bajo la premisa de comodidad térmica. Lo anterior, implementando elementos externos como tuberías bajo enterradas en el suelo, que conectan al interior de la vivienda y proceden a automatizar y controlar la temperatura. Dicho prototipo es un sistema de ventilación natural forzada, la cual puede ser monitoreada mediante los parámetros que componen el sistema (ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012).

Una vez tomadas las mediciones pertinentes de forma continua, en un ciclo de cada hora durante tres meses consecutivos, fue posible obtener resultados favorables, mostrados en la Figura 2-2., demostrando el potencial del sistema en climas de alta temperatura, tales como el caso de la ciudad de Bucaramanga.

Figura 2-2. Temperatura del suelo a una profundidad de 3 metros



Se tomó la temperatura en la ciudad de Bucaramanga a 3 metros de profundidad durante 3 meses. En verde el mes de septiembre, en rojo el mes de octubre y azul el mes de noviembre. Fuente: ADCA, OLMJ, & PJLF, 2012.

En su investigación, demuestran la efectividad de aplicar sistemas de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados en base a las premisas de los pozos provenzales o canadienses, esta tecnología es aplicable a clima cálidos y húmedos.

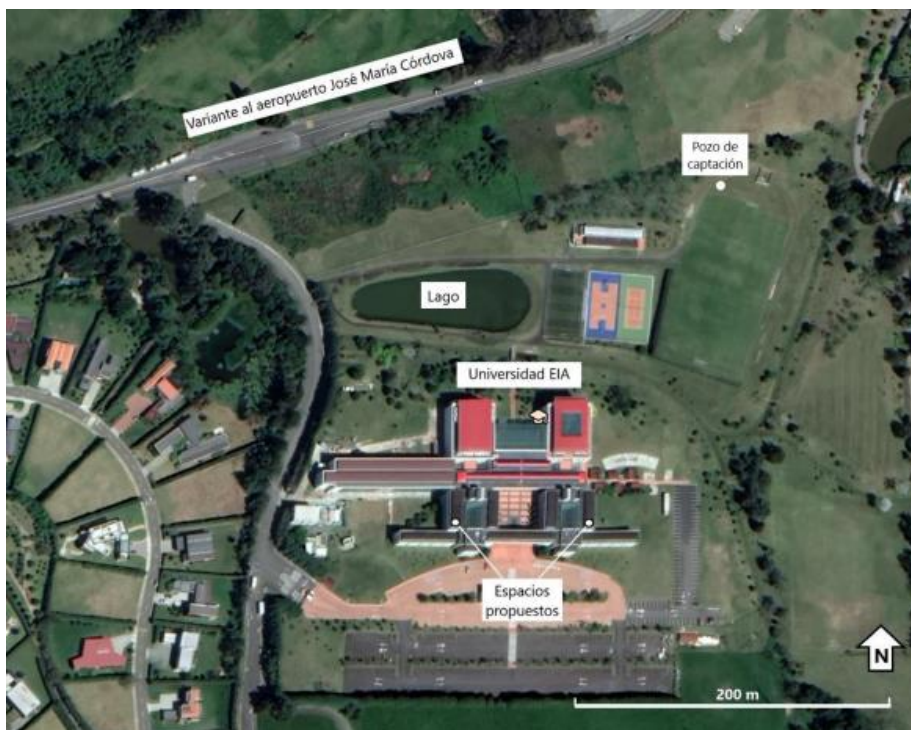
Como aportes al tema, existen otros proyectos de investigación similar. Con el uso de bombas de calor se climatizan espacios. Antes mencionado en este documento, estos son ejemplos de aplicación de sistemas de climatización por energía geotérmica somera con una instalación de captación horizontal en subsuelos.

El investigador Fernando Gutiérrez, propone un prototipo geotérmico a partir del uso de bombas de calor para la climatización en espacios de la Universidad EIA, para hacerle frente a la problemática de la demanda de energía eléctrica y la necesidad de utilizar tecnologías con energías renovables. Según cita Gutiérrez a partir de Ruiz (2019). “Los sistemas de climatización, o HVAC por sus siglas en inglés (Heating, Ventilating and Air Conditioning), consumen el 40% de la energía doméstica total, siendo para Colombia más del 25% de la demanda energética en hogares y oficinas”. A partir de allí surge la necesidad de utilizar e implementar formas de ahorro energético para los sistemas de climatización convencionales (Gutierrez Soleibe, 2021).

La Universidad EIA es reconocida por su aplicación de ingeniería e innovación, el campus posee con una infraestructura moderna, enfatiza la autosuficiencia y la protección del medio ambiente. Ofrece comodidad a los estudiantes y su personal. El campus de Las Palmas cuenta con sistemas de HVAC convencionales en algunos espacios, muchas aulas aún no cuentan con la climatización adecuada, especialmente para el clima de la zona ya que según Poveda (2006), el gradiente de temperatura atmosférica anual para el área de

Antioquia tiene un aproximado de temperatura de 5.3 °C por Km sobre el nivel del mar y es posible que la temperatura media anual para el Alto de las Palmas varíe entre 12 y 17 °C, debido a dos períodos anuales de "invierno" y dos de "verano", correspondientes a variaciones en la precipitación. La temperatura del ambiente es una variable que depende de fenómenos meteorológicos diarios, mensuales y anuales. Debido al amplio rango de valores que puede presentar, se vio en la necesidad de implementar un sistema compuesto para la calefacción y refrigeración en diferentes momentos del día, en la Figura 2-3 se enmarca la localización de la universidad, pozo de captación y los espacios propuestos para la climatización (Gutiérrez Soleibe, 2021).

Figura 2-3. Localización de la Universidad EIA sede Las Palmas



Fuente: Gutiérrez Soleibe, 2021.

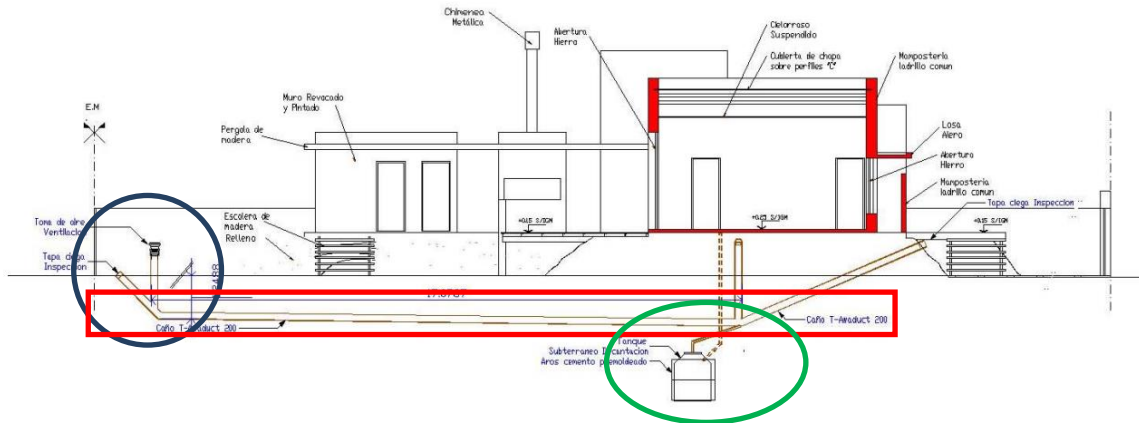
2.1.3 Investigaciones y aportes al tema a nivel internacional

Para los autores del proyecto de investigación “VIABILIDAD Y PERTINENCIA DE LOS SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL POR GEOTERMIA DE BAJO COSTO EN EL ÁMBITO DE LA CIUDAD DE SANTA FE”, El hombre, en la Argentina, presenta una dependencia creciente de la energía principalmente eléctrica, cerca del 30% es la energía eléctrica que se consume en viviendas y edificaciones. Cerca de la mitad de esta energía se usa en climatización y acondicionamiento térmico de espacios. Este régimen es impulsado por el crecimiento socioeconómico y demográfico, siendo aproximadamente el 30% de la energía que se consume se utiliza en viviendas y edificios. “Desde hace varios años, vienen trabajando de manera coordinada, cátedras institucionales como Instalaciones e Introducción a la Tecnología, en el estudio y difusión de diferentes sistemas pasivos, activos, combinados y sus sistemas de control; y en este último tiempo, en el análisis de la viabilidad y pertinencia algunos sistemas de energías renovables de baja escala y costo en el ámbito de la ciudad de Santa Fe, en especial sobre sistemas geotérmicos de baja entalpia” (Rodriguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018). (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019).

Es próspera la aplicación de intercambiadores de calor aire-tierra (ICTA) en la ciudad de Santa Fe, esta presenta condiciones de suelos adecuadas (suelos arenosos) con propiedades térmicas óptimas a una profundidad de instalación de 2,5 metros. Para poder obtener datos reales sobre costos y posibilidades de implementación, tomaron como referencia un proyecto de vivienda de unos 85 m² de superficie cubierta, próximamente a ejecutarse en la zona de la costa. En la figura 2-4., se observa el plano en vista lateral del

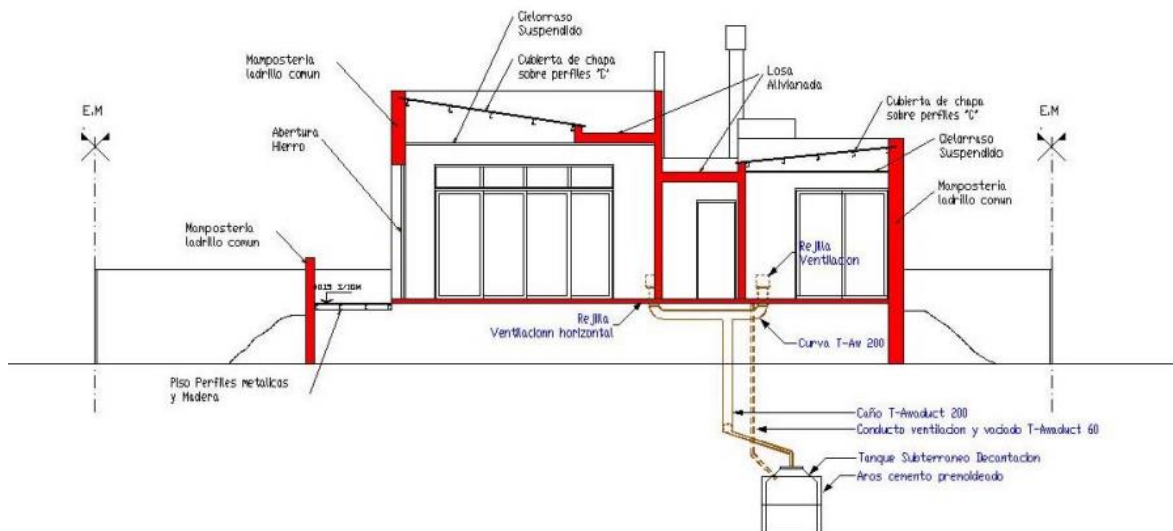
proyecto de vivienda de 85 metros cuadrados con el sistema de pozos provenzales instalado en la vivienda y en la Figura 2-5 el corte en detalle del sistema de tuberías.

Figura 2-4. Plano vista lateral con sistema de climatización pozo provenzal



En azul, el punto de captación de aire o entrada de aire al sistema. En rojo, el sistema de tuberías. En verde, el punto o zona de agua debido a la condensación o infiltración en las tuberías. Fuente: Rodríguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018.

Figura 2-5. Plano corte en detalle de instalación



Fuente: Rodriguez, Eberhardt, Chiarella, & Tejada, 2018.

Para Sol Agustina Peiretti (2017). En su práctica y proyecto de investigación “GEOTERMIA DE BAJA ENTALPIA EN SUELOS LOESSICOS: CASO DE ESTUDIO”. Se pueden hacer conclusiones de la investigación:

En primer lugar podemos resaltar la importancia de seleccionar nuevas tecnologías que puedan ser aplicadas para satisfacer las necesidades de las comunidades y poblaciones y a su vez utilizar recursos naturales y renovables como la energía y la energía geotérmica en cantidad. El aprovechamiento de la energía geotérmica a través del sistema de tubería enterrada se puede utilizar en cualquier parte del mundo, basta con conocer ciertas características del sitio de instalación, así como las características del suelo.

A diferencia de otras fuentes de energía, la energía geotérmica proporciona un flujo constante y uniforme independientemente de las variaciones estacionales como la lluvia, el sol, el viento, etc. Es importante tener en cuenta que los pozos provenzales/canadienses tienen mucho aire acondicionado en verano, lo que los convierte en la alternativa perfecta a los sistemas de aire acondicionado convencionales. Una comparación entre los costes energéticos que tiene el pozo provenzal (un extractor de bajo consumo cuando el sistema de extracción es mecánico) con los elevados costes de la climatización, favorece claramente la balanza a favor del primero. (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019). Sin embargo, en invierno, es posible que el pozo por sí solo no proporcione el calor necesario para enfriar un edificio, según la latitud. Sin embargo, pueden ayudar a precalentar el aire de manera significativa, lo que significa un ahorro significativo, ya que

se reduce la diferencia de calor que el sistema de aire acondicionado artificial tendrá que entregar. (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019). (Peiretti, 2017).

Para Ana María Cabezas (Barcelona, octubre 2012). “EFICIENCIA ENERGÉTICA A TRAVÉS DE UTILIZACIÓN DE POZOS CANADIENSES CON EL ANÁLISIS DE DATOS DE UN CASO REAL “CASA POMARET”. Se aprecian las siguientes conclusiones más relevantes de su investigación:

Los datos almacenados del monitoreo se han graficado para que se puedan visualizar los cambios de temperatura. Los resultados se obtienen en invierno, con temperaturas de hasta 27°C, entre las 14 y las 16 horas. En verano, la temperatura sube más de 28°C, de 16:00 a 20:00 horas. Además, se observaron picos de aumento de temperatura, que se atribuyeron al aislamiento de las ventanas centrales, ya que estaban desprotegidas en el momento del estudio, y al uso excesivo del sistema de ventilación natural, calefacción y pozos. (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019).

Se puede determinar que el cambio de temperatura al interior de la casa está influenciado de 1° C a 4° C durante el encendido del pozo. La temperatura del aire que ingresa al pozo en invierno nunca ha sido inferior a 16°C, por lo que, si se observa intercambio de calor con el sótano, se logra ingresar a la vivienda con una temperatura entre 17°C y 19°C. sótano es de 1° C a 3 ° C. No use el pozo porque la temperatura exterior es inferior a 16 ° C. En verano, la temperatura promedio del aire que ingresa al pozo es de 24 ° C y sale alrededor de 21 ° C. En verano, la transferencia de calor en el pozo se siente mejor.

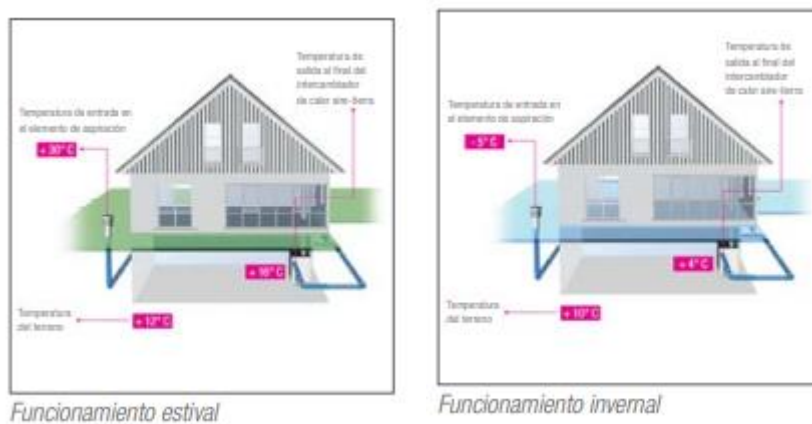
El uso de un pozo tiene un mayor efecto en verano, siempre que se active antes de que se alcance la temperatura máxima interior y se apoye en la ventilación natural. También se ha observado que los pozos pueden mantener una temperatura interna constante, si la temperatura exterior no cambia demasiado drásticamente (Aguirre Tapullima & Ordoñez Chimbo, 2019).

Dentro de la explotación de los recursos geotérmicos con ánimos lucrativos y económicos existen empresas dedicadas a la fabricación e implementación de estos sistemas de climatización. En España, existe una empresa dedicada explícitamente a la instalación de intercambiadores de calor tierra-aire bajo la premisa de pozos provenzales. Rehau Unlimited Polymer Solutions, es una empresa con presencia en Canadá, España y gran parte del continente europeo, a la vez, son líderes de soluciones basadas en polímeros para la construcción, la automoción y la industria

Diferentes profesionales han estado buscando alternativas de diseño y constructivas que permitan disminuir las necesidades energéticas de las estructuras. Un ejemplo de ello, son los intercambiadores de calor del suelo, también llamados AWADUKT de REHAU, los cuales contribuyen inmensamente a la reducción del uso energético de un edificio. Otro aspecto a destacar es la capacidad de almacenamiento de energía tanto de los materiales empleados como del terreno donde se ubican los proyectos, utilizando dicha capacidad para ventilar de forma controlada los espacios interiores y ofrecer una demanda energética sustentable y sostenible. El primer intercambiador de calor basado en las propiedades del suelo con una capa interna antibacteriana fue desarrollado por REHAU. Todos estos aspectos impulsan a los diseñadores y constructores y cualquiera interesado en reducir el

impacto ambiental y los costos de producción, a buscar e implementar tecnologías de energía limpia en sus proyectos (REHAU Unlimited Polymer Solutions, 2016). En la Figura 2-6 podemos observar el funcionamiento del intercambiador AWADUKT de la empresa REHAU, a la izquierda funcionamiento en verano, a la derecha funcionamiento en invierno.

Figura 2-6. Funcionamiento intercambiador AWADUKT de Rehau



Fuente: REHAU Unlimited Polymer Solutions, 2016.

En la Figura 2-7 se expone un ejemplo de instalación para uso residencial de los intercambiadores AWADUKT por parte del grupo Rehau.

Figura 2-7. Intercambiador AWADUKT THERMO aplicaciones residenciales



Fuente: REHAU Unlimited Polymer Solutions, 2016.

3. Capítulo 3: Cálculos y criterios de diseño

En el capítulo tres se plantea un mapa de diseño en el cual se puede hacer una selección adecuada de los parámetros de diseño del intercambiador tierra-aire. Se expone una estrategia de diseño y un método de cálculo basado en la metodología de De Paepe & Janssens. En este capítulo se presenta un análisis analítico del intercambiador basado en la definición de la eficiencia del intercambiador de calor. Adicionalmente, se realiza la aplicación del método en un caso de estudio de una vivienda unifamiliar para tomar como referencia la futura implementación en estructuras similares.

3.1 Dimensionado y método de cálculo

Bajo la literatura disponible, se pueden encontrar diversos modelos de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor tierra-aire; clasificando los algoritmos en dos

grandes grupos: un primer cálculo de transferencia de calor desde el aire circundante al interior de la tubería; y el otro determina la transferencia de calor de dicho elemento al suelo; para ambos casos, los datos de entrada que se requieren tienen que ver con las características geométricas tales como las dimensiones del sistema, las características térmicas de la tubería y el suelo, y finalmente, la temperatura del suelo durante el periodo de funcionamiento del sistema (De Paepe & Janssens, 2003).

La resolución se realiza utilizando herramientas matemáticas debido a la complejidad de la mayoría de los métodos térmicos. En la mayoría de los casos, el intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) es solo un elemento de todo el sistema del edificio. Los diseñadores no tienen mucha libertad para determinar el tamaño y la disposición de los ductos del ICTA. El objetivo principal es elegir la longitud, el diámetro y el número de tuberías. Los criterios de diseño están limitados por el espacio y las condiciones económicas del sistema.

3.1.1 Análisis de parámetros de diseño

Los requisitos de diseño se logran calentando o enfriando el aire de ventilación en el conducto enterrado desde la temperatura del aire exterior hasta la temperatura del suelo dentro del tubo. Se sigue el método de análisis térmico de (De Paepe & Janssens, 2003).

Por tanto, es necesario conocer:

- \dot{m}_{aire} ; Caudal másico de aire [Kg/s]
- $T_{aire,en}$; Temperatura del aire de entrada [K]
- $T_{aire,sal}$; Temperatura del aire de salida [K]

- T_{suelo} ; Temperatura del suelo [K]

El flujo másico de aire y la temperatura del aire de salida se determinan de acuerdo con los requisitos de diseño. Las temperaturas del aire de entrada y del suelo están sujetas a las condiciones climáticas de diseño de la materia.

La temperatura del suelo está determinada por el clima y la composición del suelo. Las fluctuaciones de temperatura del suelo disminuyen a medida que aumenta la profundidad de la tubería.

3.1.2 Dimensiones del intercambio de calor

Los parámetros de dimensionamiento del intercambiador de calor tierra-aire son:

- D : Diámetro del ducto
- L : Longitud del ducto
- n : Número de tuberías en paralelo instaladas

Para el diseñador, estos parámetros tienen que ser determinados de tal manera que se cumplan las condiciones de contorno y el rendimiento del intercambiador de calor. Esto significa que la ubicación, el espacio disponible, el diseño del edificio y la economía imponen restricciones a la elección de la longitud y el número de tubos.

3.1.3 Eficiencia del intercambiador de calor y NTU

En un intercambiador aire-tierra, el aire es el único fluido caloportador. El calor es liberado o absorbido por el aire que fluye a través de las paredes de la tubería hacia el

suelo circundante. (De Paepe & Janssens, 2003). El calor total transferido al aire a medida que fluye a través de una tubería enterrada se puede escribir:

$$\dot{Q} = m_{aire} \dot{C}_{p,aire} (T_{aire,sal} - T_{aire,en}) \quad (3.1)$$

Dónde; $C_{p,aire}$: Capacidad térmica del aire. [J/KgK]

Debido a la convección entre la pared y el aire, el calor transferido también puede se puede escribir:

$$\dot{Q} = U_{tot} A \Delta T \quad (3.2)$$

Donde;

U_{tot} : Coeficiente global de intercambio de calor [W/m²·K].

A : Área de transferencia de calor. [m²]

ΔT : Diferencial de temperaturas. [K]

El coeficiente global de transferencia, UT , se puede calcular como el inverso de la resistencia térmica total del sistema por el área de transferencia de calor. En este caso, la resistencia total se compone por la resistencia de convección del aire, la resistencia de conducción de los tubos y la resistencia de conducción del suelo. Siendo la resistencia total:

$$R_{tot} = R_{aire} + R_{tubo} + R_{suelo} \quad y \quad U_{tot} = \frac{1}{R_{tot}A}$$

Donde:

R_{tot} : es la resistencia térmica total [K/W]

R_{aire} : es la resistencia térmica del aire [K/W]

R_{tubo} : es la resistencia térmica de los tubos [K/W]

R_{suelo} : es la resistencia térmica del suelo [K/W]

A: es el área de intercambio de calor [m²]

En el Anexo A se muestra las ecuaciones y los parámetros para el cálculo de las resistencias térmicas que actúan en el ICTA

Se considera que la conductividad del tubo es mucho menor que la del suelo, por lo que la temperatura de la pared del tubo es igual a la temperatura del suelo (De Paepe & Janssens, 2003). $T_{suelo} = T_{pared}$

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{(T_{aire,en} - T_{suelo})(T_{aire,sal} - T_{suelo})}{\ln[(T_{aire,en} - T_{suelo})/(T_{aire,sal} - T_{suelo})]} \\ &= \frac{T_{aire,en} - T_{aire,sal}}{\ln[(T_{aire,en} - T_{suelo})/(T_{aire,sal} - T_{suelo})]} \quad (3.3) \end{aligned}$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene una relación exponencial de la temperatura de salida del aire en función de la temperatura de la pared y la temperatura de entrada:

$$T_{aire,sal} = T_{suelo} + (T_{aire,en} - T_{suelo})e^{-\frac{U_{tot}A}{m_{aire}c_{p,aire}}} \quad (3.4)$$

Si se usa un tubo de longitud infinita ($A = \infty$), el aire se calienta o se enfría a la temperatura de la pared. La eficacia de un intercambiador de calor tierra-aire se puede determinar de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{T_{aire,sal} - T_{aire,en}}{T_{suelo} - T_{aire,en}} \quad (3.5)$$

Utilizando la ecuación (3.4), la eficiencia es:

$$\epsilon = 1 - e^{-\left(U_{tot}A / \dot{m}_{aire}C_{p,aire}\right)} \quad (3.6)$$

El valor exponencial de ϵ se llama “número de transferencia de unidades” (NTU):

$$NTU = \frac{U_{tot}A}{\dot{m}_{aire}C_{p,aire}} \quad (3.7)$$

La ecuación (3.6), quedaría expresada:

$$\epsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (3.8)$$

3.1.4 Influencia de NTU en la transferencia de calor

El NTU consta de tres parámetros que pueden variar:

h : el coeficiente de convección del aire dentro del tubo

A : Sección transversal del tubo

\dot{m}_{aire} : el caudal másico de air

El área depende del diámetro y de la longitud y está dada por $A = \pi DL$, El coeficiente de convección dentro de un tubo se define por:

$$h = \frac{Nu\lambda}{D} \quad (3.9)$$

El número de Nusselt para el flujo dentro de un tubo viene dado por:

$$Nu = 3.66 \text{ si } Re < 2300 \quad (3.10)$$

$$Nu = \frac{\frac{\varepsilon}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{\frac{\varepsilon}{8}}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.11)$$

Donde,

$$\varepsilon = (1.82\log Re - 1.64)^{-2} \quad (3.12)$$

Si $2300 \leq Re < 5 \times 10^6$ y $0.5 < Pr < 10^6$

La ecuación (10) se aplica a un flujo laminar completamente desarrollado. La ecuación (11) da un flujo turbulento en un tubo con una superficie interior lisa. El número de Reynolds está relacionado con la velocidad del aire y el diámetro promedio:

$$Re = \frac{V_{aire}D}{\nu_{aire}} \quad (3.13)$$

Donde; V_{aire} = *Velocidad característica del aire* y ν_{aire} = *viscosidad cinemática del aire*

El número de Prandtl:

$$Pr = \frac{v_{aire}}{\alpha_{aire}} \quad (3.14)$$

El caudal másico viene dado por:

$$m_{aire} = \rho_{aire} \frac{\pi D^2}{4} V_{aire} \quad (3.15)$$

Donde; ρ_{aire} = densidad del aire

La longitud L es un parámetro independiente que influye en NTU. Hay una variación lineal de NTU con la longitud. Cambiar el diámetro D o la tasa de flujo másico \dot{m} cambian la velocidad del aire dentro del tubo. Esto da como resultado un número de Reynolds cambiante. Por lo tanto, D y \dot{m} no tienen influencia independiente en NTU. Como NTU varía linealmente con L, el parámetro NTU/L solo depende de D y \dot{m} (De Paepe & Janssens, 2003).

3.1.5 Influencia de la caída de presión

La caída de presión en un tubo liso viene dada por:

$$\Delta_P = \varepsilon \frac{l}{D} \rho_{aire} \frac{v_{aire}^2}{2} \quad (3.16)$$

3.1.6 Caída de presión específica

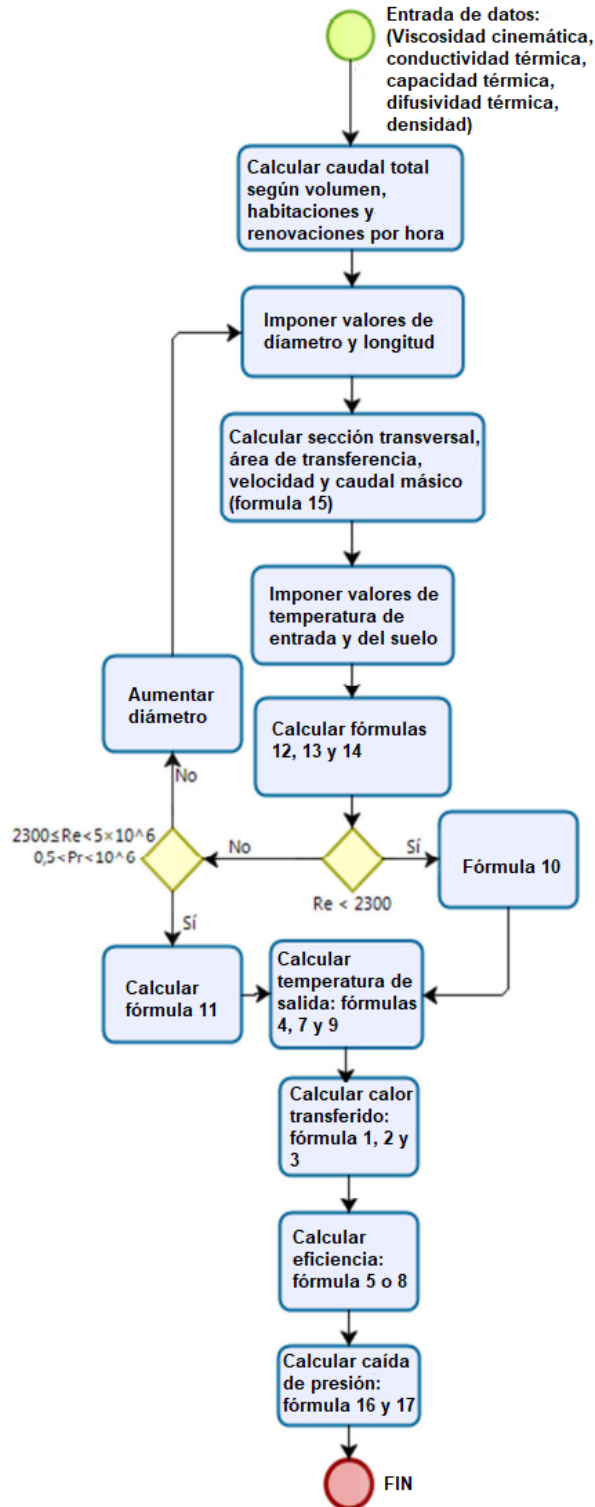
La caída de presión específica J está definida por la ecuación (3.17)

$$J = \frac{\Delta p}{NTU} \quad (3.17)$$

Donde J es una medida de la caída de presión necesaria para realizar una unidad de NTU.

Para facilitar la implementación del análisis térmico expuesto en el modelo de De Paepe & Janssens, 2002, se propone una metodología donde se expone el orden a seguir para realizar los cálculos y poder aplicarlos en los criterios de diseño del ICTA. En la Figura 3-1 se plantea un diagrama de flujo para realizar los cálculos del sistema.

Figura 3-1. Diagrama de flujo para los cálculos del sistema



Fuente: Autor, 2022 de (Voos, Brondino, Berli, & Di Paolo, 2018).

3.2 Elementos de instalación

En el apartado 1.5.3 se teoriza los pozos provenzales o canadienses y sus diferentes configuraciones, a continuación, se hablará de los elementos de instalación que componen los criterios de diseño del ICTA

Los ductos de la instalación pueden ser de diversos materiales, pero deben ser óptimos en concepto de resistencia a la compresión y presentar adecuada conductividad térmica. Por lo general, se selecciona el material dependiendo de las características de la instalación, así mismo, las cargas que tengan que soportar. Los materiales más comunes observados en la bibliografía son: PVC, polipropileno, hormigón y acero inoxidable (Escudero, 2021). (Tabla 3-1)

Tabla 3-1. Conductividad térmica de los materiales más empleados

Material	Conductividad térmica [W/mK]
PVC	0,17
Polipropileno	0,22
Hormigón en masa	0,8-1,9
Acero inoxidable	14,2-15,1

Fuente: Escudero, 2021.

Existen dos riesgos comunes en el intercambiador de calor, estos son las partículas en el aire de entrada y la presencia de humedades a raíz de la interacción del agua condensada proveniente del aire. Para garantizar que las condiciones del aire impulsado son adecuadas, se instalan filtros en la entrada y salida del ICTA. Normalmente se usan filtros opacímetros, los cuales detienen el polvo y polen, se aconseja que su limpieza sea

cada mes, aunque dependerá de la ubicación de instalación y la polución en el aire (Escudero, 2021).

El riesgo de condensación en el interior de los conductos, el cual depende de la situación climática, así como de la profundidad de excavación y la velocidad del aire, puede implicar crecimiento de moho y la aparición de malos olores, por lo tanto, se deben limpiar los conductos anualmente. Las soluciones desinfectantes con agua servirán para el proceso de limpieza, la cual se podrá realizar únicamente si la tubería presenta una pendiente que permita la evacuación de los líquidos, por lo cual, se recomienda realizar la instalación con una pendiente del 2% (Escudero, 2021).

3.2.1 Punto de captación de aire y filtros

Este punto en el sistema es donde el aire exterior ingresa al intercambiador de calor. Esta entrada debe estar situada un poco más arriba (de 1 a 1,5 metros) para evitar aspirar aire contaminado. También por este motivo, también se eligieron las cuencas hidrográficas como lugares donde el aire seguía circulando; Evite los huecos donde quede aire atrapado. Los filtros instalados en las aberturas de ventilación se utilizarán principalmente para evitar la entrada de polvo, suciedad e insectos en las tuberías y sistemas; se puede utilizar cualquier tipo de filtro que cumpla esta función básica (Avilés Jiménez, 2019). En la Figura 3-2 se observa la configuración e instalación del punto de captación de aire con los filtros necesarios para el sistema de climatización por intercambiador de calor tierra-aire.

Figura 3-2. Punto de captación de aire y filtros ICTA



Fuente: Internet, 2022.

3.2.2 Punto de drenaje de condensados

Se puede formar condensación en los sistemas de tuberías a medida que se enfría el aire que ingresa al intercambiador. Para garantizar el funcionamiento a largo plazo del intercambiador de calor aire-tierra y evitar la formación de olores, es necesario drenar continuamente el condensado. Esto incluye un punto de descarga y un orificio instalado en el sistema de tuberías para facilitar el drenaje de líquidos y no aerosoles del sistema al suelo.

3.2.3 Elementos de circulación de aire

Para la circulación del aire en el sistema de intercambiador de calor y que llegue a la habitación deseada a climatizar, para esto, se debe tener un sistema que proporciones ese movimiento de aire deseado. Hay varios sistemas de ventilación básicos en el ámbito residencial, natural o forzada.

- **Natural:** En los sistemas de ventilación natural sin ventiladores, la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperaturas entre el punto de entrada y el de salida. Es importante tomar en cuenta que con este sistema no se garantizan los caudales mínimos de ventilación (Avilés Jiménez, 2019).

- **Forzada:** En los sistemas de ventilación forzada, la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción mecánica ejercida por los inyectores o extractores de aire. Con este sistema se puede garantizar los caudales mínimos de ventilación requeridos para cada sistema.

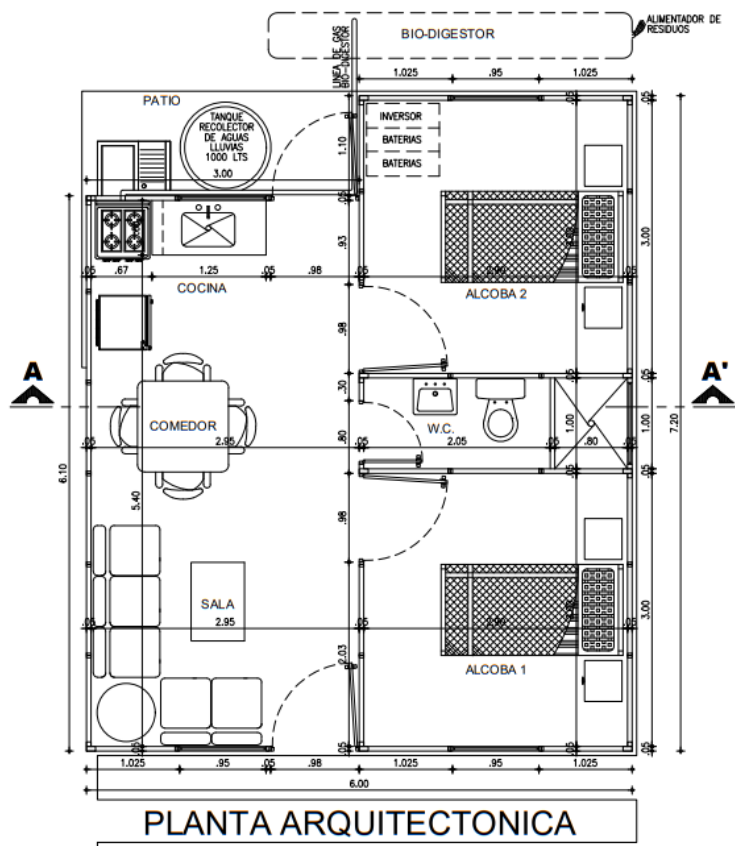
Existen diferentes tipos de ventilación forzada o mecánica; sin embargo, uno que se utilizará en esta aplicación sería la ventilación mecánica con suministro mecánico y extracción natural debido a su economía y ventajas para los sistemas de intercambio de calor por aire y suelo. En este sistema de ventilación forzada, el aire es recibido mecánicamente por ventiladores/boquillas a través de conductos, mientras que la entrada de aire se produce de forma natural a través de rejillas o ventanas conectadas a cada habitación del espacio habitable.

3.3 Caso de estudio para el diseño del ICTA

En el caso de estudio en este trabajo corresponde a un diseño arquitectónico de casas tipo para un proyecto autosostenible que, cuentan con un área construida de 39.9 metros cuadrados, estas, están constituidas por dos habitaciones, un baño, sala, comedor, cocina y patio al aire libre, además de contar con paneles solares y un sistema de recolección de aguas lluvias. La propuesta de vivienda busca que personas con pocos

recursos tengan acceso a una vivienda autosostenible a un bajo costo, promoviendo así el uso de energías renovables en los proyectos de construcción, de allí se toma como referencia para el caso de estudio de este proyecto de investigación. Las dimensiones características de la vivienda se muestran en la Figura 3-3; la edificación posee un perímetro aproximado de 26.5 metros y una altura de 2.2 metros, cuenta con 4 ambientes de los cuales se desea climatizar los dos dormitorios, la sala y la cocina. En la Tabla 3-2, se muestran los parámetros de diseño iniciales para el ICTA, dentro de los cuales es importante conocer el volumen a climatizar, las renovaciones por hora, y el caudal de aire necesario para climatizar los ambientes en la residencia.

Figura 3-3. Planta arquitectónica casa hueso propuesta de proyecto urbanístico



Fuente: Autor, 2022.

Las renovaciones del aire es el proceso a través del cual se reemplaza gradualmente el aire contaminado con CO₂ de una estancia por aire nuevo y fresco, esto, es importante a tener en cuenta no solo por el confort si no por motivos de salubridad.

Tabla 3-2. Dimensiones y renovaciones por hora de la vivienda

Superficies	Espacios	Renovaciones / h	Áreas (m ²)	Volúmen (m ³)
PRIMER PISO	Sala - comedor	2	15,93	35,05
	Dormitorio 1	1,5	8,7	19,14
	Dormitorio 2	1,5	8,7	19,14
	Cocina	2	2,74	6,03
Totales		7	36,07	79,36

Fuente: Autor, 2022.

Tal como se evidencia en la Tabla 3-3, el caudal de aire requerido es la cantidad total de renovación de aire que corresponde a cada espacio de la vivienda según la actividad que se desarrolle en él, es decir, el caudal total de intercambio. Es necesario un caudal total a suministrar de $139,58 \text{ m}^3/h$.

Tabla 3-3. Caudal y renovaciones de aire necesarias

Espacios	Renovaciones / h	Áreas (m ²)	Caudal (m ³ /h)
Sala - comedor	2	35,05	70,1
Dormitorio 1	1,5	19,14	28,71
Dormitorio 2	1,5	19,14	28,71
Cocina	2	6,03	12,06
Total caudal			139,58

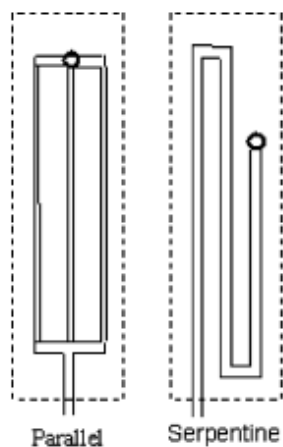
Fuente: Autor, 2022.

3.3.1 *Diámetro, longitud y disposición*

Una vez conocidas las exigencias de ventilación, el diseño térmico del intercambiador de calor solo depende de las limitaciones económicas y de proceso constructivo. Se requieren determinar tres dimensiones: diámetro y longitud de los ductos y número de tubos, en el caso de configuración en paralelo.

La caída de presión y el rendimiento térmico aumentan con la longitud. Los ductos de diámetros pequeños aumentan la transferencia de calor, pero ocasionan una mayor caída de presión. La configuración en paralelo suministra una mejora en cuanto a la baja de presión, sin embargo, requiere de una mayor área del terreno a ocupar, esto limita a que la instalación se planifique y se realice paralelamente a la construcción de la vivienda, no facilitando así su incorporación a una casa ya construida, más aún si el espacio es menor (Voos, Brondino, Berli, & Di Paolo, 2018). En la figura 3-4, se muestran las diferencias visuales entre una configuración en serpentina y en paralelo.

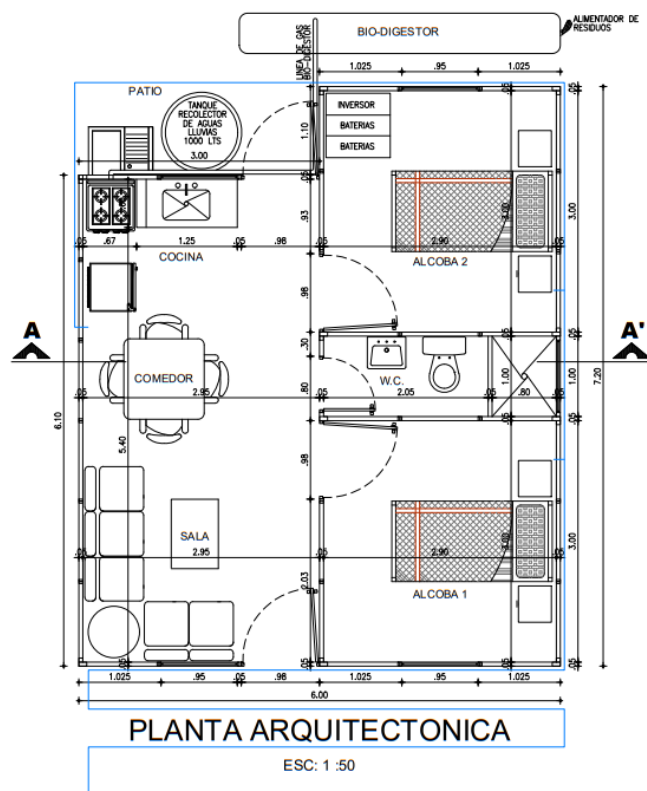
Figura 3-4. *Disposición de los tubos enterrado en una franja del suelo*



Fuente: De Paepe & Janssens, 2002

Para seleccionar el diámetro y la longitud del intercambiador de calor tierra-aire nos basamos en las configuraciones de la vivienda. Teniendo en cuenta que el sistema requiera de una poca intervención al momento de reparaciones y que este no debe generar molestias a los habitantes de la vivienda, anteriormente se mencionaba que esta tiene un perímetro de 26,5 metros, se adopta una configuración de tipo serpentina, posicionando los ductos alrededor de la edificación (tipo anillo) con una longitud de tubo aproximada de 35 metros. Esto significa una inversión menor para la instalación del ICTA, disponiendo del espacio disponible del terreno alrededor de la vivienda. En la Figura 3-5 se muestra la configuración del sistema ICTA en la residencia.

Figura 3-5. Planta arquitectónica casa hueso con sistema ICTA



En azul, tubería perteneciente al sistema de climatización – intercambiador de calor Tierra-Aire. Fuente: Autor, 2022

3.3.2 Cálculos preliminares

Para proceder a aplicar el método de diseño del sistema de intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) mencionado anteriormente en el capítulo 3.1, es preciso conocer propiedades específicas que son fundamentales para el desarrollo del diseño, propiedades tanto del suelo como del material de los tubos. Según (Hermelin, 2007) en Neiva, se tiene en gran parte un suelo arcilloso seco, de la Tabla 1-4. Propiedades de transferencia de calor para tipos de suelos tomamos los valores para un tipo de suelo arcilloso. De la tabla 3-1. Conductividades térmicas de distintos materiales se toma el valor de la conductividad térmica para los ductos de PVC y las propiedades del fluido (Aire) se toman del Anexo C. (Tabla 3-4). Si se desea un valor más exacto de la zona de instalación se recomienda realizar un estudio de suelos para obtener las propiedades físicas del suelo exactas, de lo contrario se asume un comportamiento térmico general en la zona de estudio del presente proyecto.

Tabla 3-4. Parámetros de diseño a considerar

PARAMETROS DE DISEÑO				
		Aire	Suelo arcilloso seco	Tubo PVC
Conductividad térmica	W/Km	0,02625	1,046	0,17
Densidad	Kg/m3	1,145	1803,1	
Capacidad térmica	J/KgK	1007	1840	
Viscosidad dinámica	Kg/m.s	0,00001895		
Viscosidad cinemática	m2/s	0,00001655		
Difusividad térmica	m2/s	0,00002277		

Fuente: Autor, 2022.

Se siguen los cálculos de acuerdo con la metodología propuesta en la Figura 3-1, se asume una configuración del tipo anillo la cual es construida con tubos de PVC de diámetro exterior de 0,0762 m, un extractor de aire con una velocidad de 5m/s y así

mantener una velocidad constante al interior del ICTA. De acuerdo con la bibliografía consultada y las investigaciones realizadas por los autores, se asume una temperatura del suelo de 17°C a una profundidad de 2,5 metros para zonas tropicales donde carece la existencia de estaciones marcadas por fechas exactas, la temperatura de entrada al intercambiador varía dependiendo de las condiciones ambientales del lugar, para los cálculos de diseño del ICTA se propone una temperatura estable de 30°C. En la Tabla 3-5 se observan los parámetros de diseño iniciales como longitud de acuerdo con el perímetro de la vivienda, diámetro, temperatura ambiente de entrada y temperatura del suelo.

Tabla 3-5. Variables de parámetros de diseño iniciales

	Valor	Unidades
ICTA		
Diametro	0,0762	m
Longitud	35	m
Número tubos	1	
TEMPERATURAS		
Temperatura de entrada	303	K
Temperatura del suelo	290	K

Fuente: Autor, 2022.

Gracias a una plantilla de cálculos programada previamente en Excel y las ecuaciones explicadas al comienzo de este capítulo, se obtienen las demás variables necesarias para la configuración del sistema. En la Tabla 3-6 se exponen los resultados obtenidos de los cálculos, observando el caudal másico del aire dentro del ducto, el coeficiente de convección del aire, el área de transferencia de calor del tubo, NTU, la temperatura media logarítmica, número de Reynolds, Prandtl y Nusselt, así como el factor de fricción.

Tabla 3-6. Resultados de cálculos según plantilla programada en Excel

	Valor	Unidades
velocidad aire	5	m/s
caudal másico aire	0,02610816	Kg/s
coeficiente de convección	20,1179934	W/m ² K
Área sección transversal tubo	8,3786472	m ²
NTU	1,29491917	
Temperatura media logaritmica	7,28940113	K

Numero de reinolds	23021,148
Numero de prandtl	0,72683355
Factor de fricción	0,02520269
Número de nusselt	58,3996608

Fuente: Autor, 2022.

Para el caso de la velocidad del aire que ingresa al intercambiador, de manera natural no se logra obtener una velocidad constante, como se explica en el apartado 3.2.3, es necesario implementar un elemento mecánico que permita una ventilación constante que cumpla con los requerimientos del intercambiador. En la Figura 3-6 se propone un inyector de la empresa Atenas.

Figura 3-6. Soplador e inyector de aire para el ICTA



Fuente: Autor, 2022. Información técnica obtenida de Atenas.

Con las dimensiones del ICTA establecidas, queda seleccionar el inyector o forzador de aire. Este debe ser capaz de suministrar aproximadamente un caudal de 140 metros cúbicos por hora, para lograr la climatización de los espacios. El inyector de aire monofásico de referencia APM-1/3, tiene las siguientes características: Motor normalizado de 1/3 caballos de fuerza y 2800 rpm, una boquilla circular de entrada y salida circular de 100 mm, caudal de 480 m³/h de los cuales 140 m³/h son necesarios, y presión de 25 mm de columna de agua, es decir 250 Pa de 165 Pa necesarios.

Como se observa en el Anexo B al final del documento los resultados obtenidos en la plantilla de cálculos programada en Excel, observamos las resistencias que intervienen por conducción y convección en la transferencia de calor como se expone en el Anexo A. Por último, utilizando el modelo de análisis térmico mencionado anteriormente, se obtiene como resultado final una temperatura de salida de 20°C y una eficiencia del ICTA del 73% aproximadamente como se puede observar en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Resultados obtenidos de temperatura de salida y eficiencia del ICTA

	Valor	Unidades
Temperatura salida	293,561099	K
Temp. Salida	20,4110989	°C
Eficiencia ICTA	72,6069319	%

Fuente: Autor, 2022.

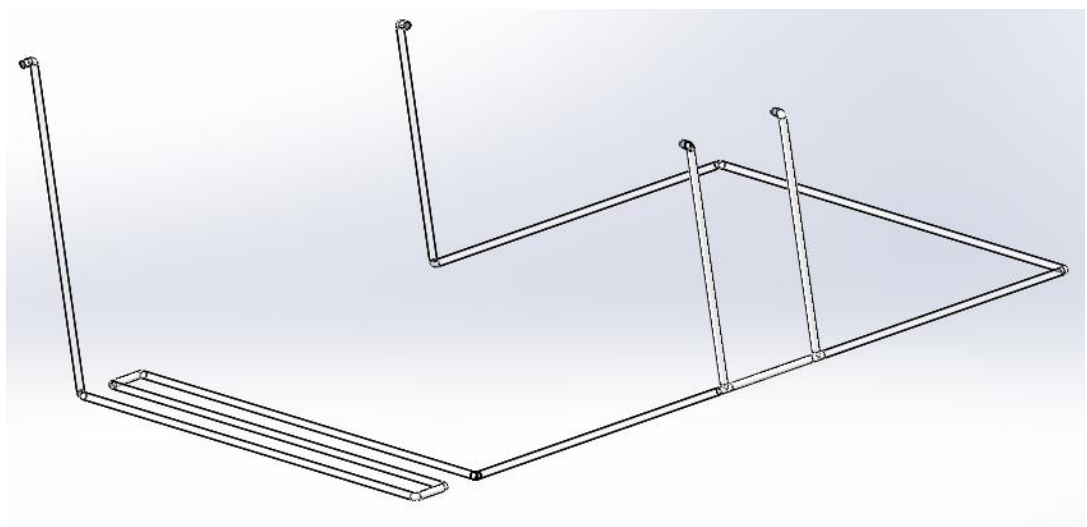
4. Capítulo 4: Simulación y validación

En el capítulo cuatro se exponen los resultados de las simulaciones CFD realizadas en el software SolidWorks con su complemento Flow Simulation, mediante los análisis térmicos y comportamientos del fluido al interior del intercambiador de calor. Adicional a ello se muestran y definen cada uno de los componentes del sistema, aquellos que conforman en la estructura final de instalación para su posterior análisis y simulación.

4.1 Elementos de ensamblaje

En el caso de estudio mencionado en el capítulo 3.3, se opta por una instalación tipo anillo alrededor de la casa, en la zona perimetral de la misma. Además, como se había citado en apartados anteriores el ICTA tendrá un diámetro de 0.0762 metros (3 pulgadas en el sistema inglés) y una longitud final aproximada de 35 metros. En la Figura 4-1 se muestra la configuración final de instalación del sistema de climatización.

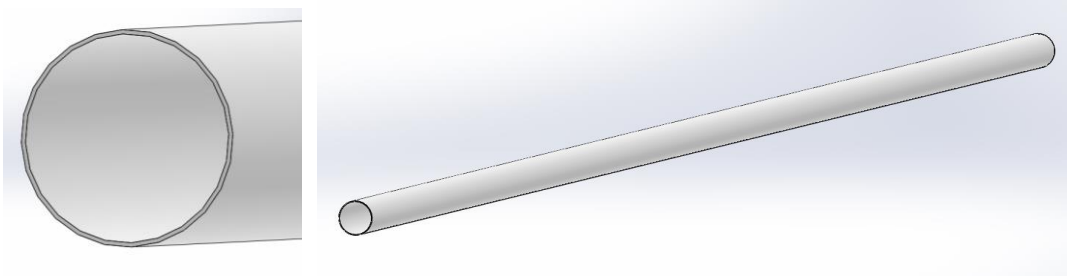
Figura 4-1. Intercambiador de calor tierra-aire ensamblaje final



Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks.

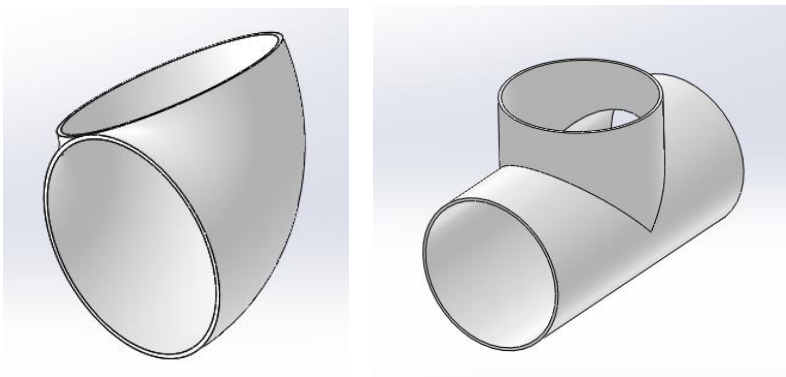
Los elementos que conforman la configuración final de simulación se muestran a continuación. Para esta instalación se tiene en cuenta la disponibilidad comercial de los tubos de PVC de 3” pulgadas de diámetro por 6 metros de largo, en algunas partes de la instalación será necesario el corte de tubos para poder cumplir con las dimensiones de la casa, a su vez, será necesario la implementación de uniones de PVC con el fin de dar la configuración diseñada al sistema ICTA. En el Anexo F se pueden observar los planos del sistema. A continuación, en las Figuras 4-2 y 4-3, podemos observar los diferentes elementos que componen el diseño necesario para la simulación.

Figura 4-2. Tubería PVC



Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks.

Figura 4-3. Uniones y conexiones PVC



En la izquierda, codo de unión a 90 °C PVC. A la derecha, conexión Tee PVC.

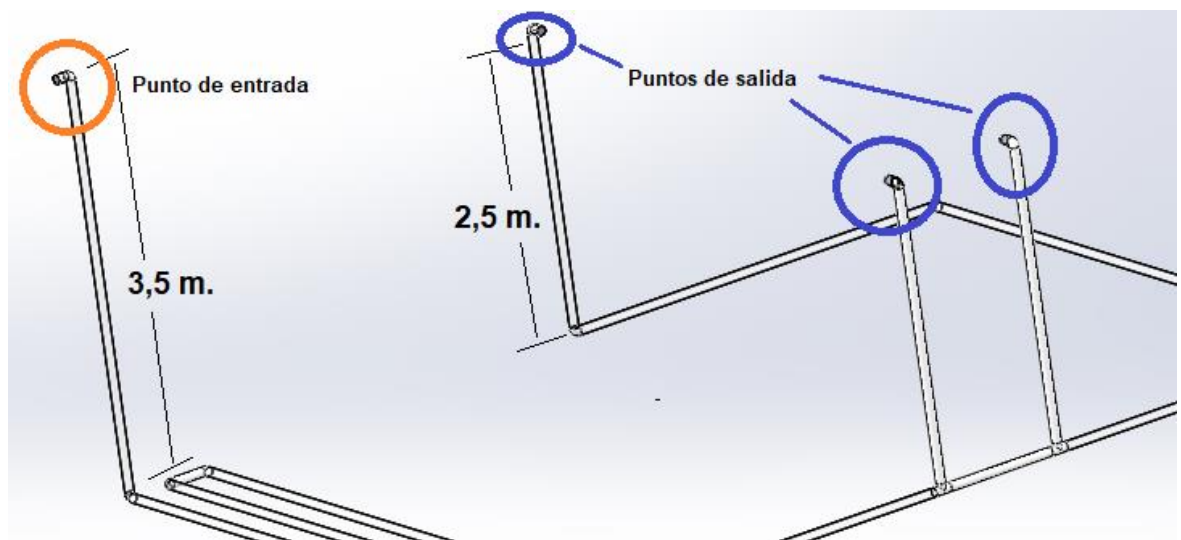
Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks.

4.2 Resultados de la simulación

Una vez halladas cuáles serán las características físicas y los criterios de diseño, se utilizará la herramienta de fluidos de SolidWorks para llevar a cabo una simulación y comprobar si los cálculos realizados anteriormente coinciden con las condiciones aproximadas de la realidad. La herramienta de SolidWork Flow simulation se enfoca en el uso de mallas basadas en coordenadas cartesianas, estas son elementos fundamentales de la conexión de CAD/CFD para la simulación de fluidos integrada en CAD (Sobarchkin, 2013). Como ventajas que ofrece el método numérico de mallas cartesianas encontramos la sencillez, velocidad y solidez de los algoritmos de generación de mallado, la minimización de errores de truncado local y la solidez del esquema diferencial.

En la configuración propuesta se tiene una boca toma de aire o un punto de entrada desde el exterior de la vivienda y tres puntos de salida del fluido (aire), la cuales, estos van instalados al interior de las áreas a climatizar. Los ductos se instalan a 2,5 metros de profundidad, en la Figura 4-4 se destacan los puntos por donde ingresa y egresa el aire.

Figura 4-4. Puntos de entrada y salida del fluido del sistema

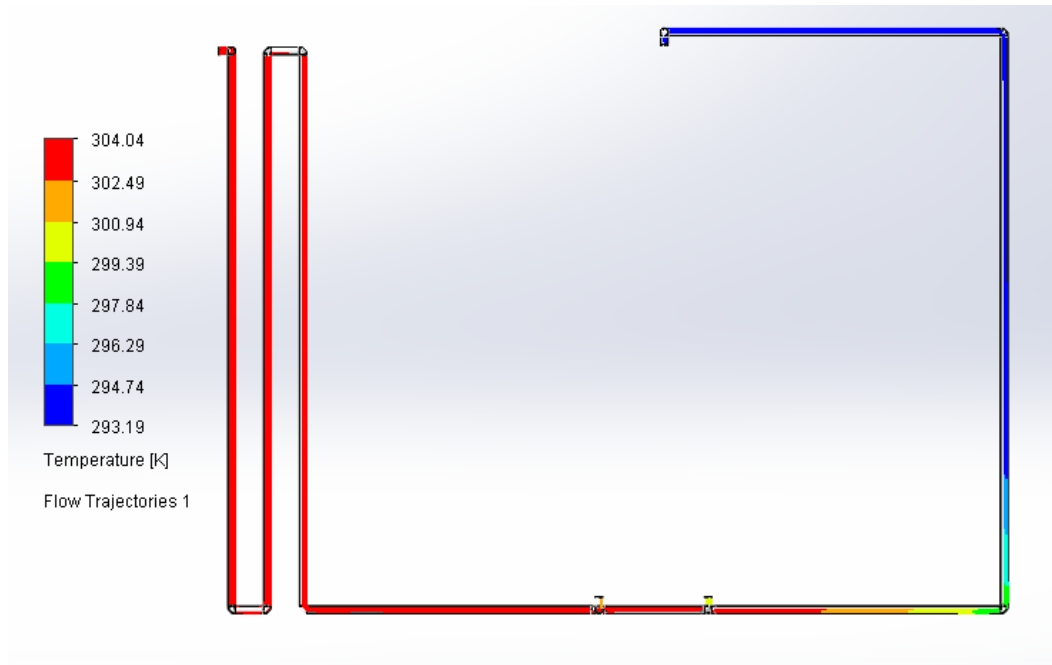


Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks.

Una vez transcurrido el tiempo de ejecución necesario para que la simulación de los análisis CFD y térmicos arroje los resultados. Lo primero que se procedió a comprobar (como objetivo principal de este intercambiador) fue la temperatura del fluido, para corroborar si se había transferido la cantidad de calor y este cumpliera con el objeto de climatizar y enfriar en el punto de salida. En la Figura 4-5 se detalla el comportamiento del fluido según las condiciones de temperatura.

La temperatura en el punto de entrada del fluido se encuentra en color rojo según la paleta de color presentada por el programa, el fluido ingresa al interior del ICTA a una temperatura de 304,04 K o 31 °C, la cual corresponde a la temperatura ambiente al exterior de la vivienda.

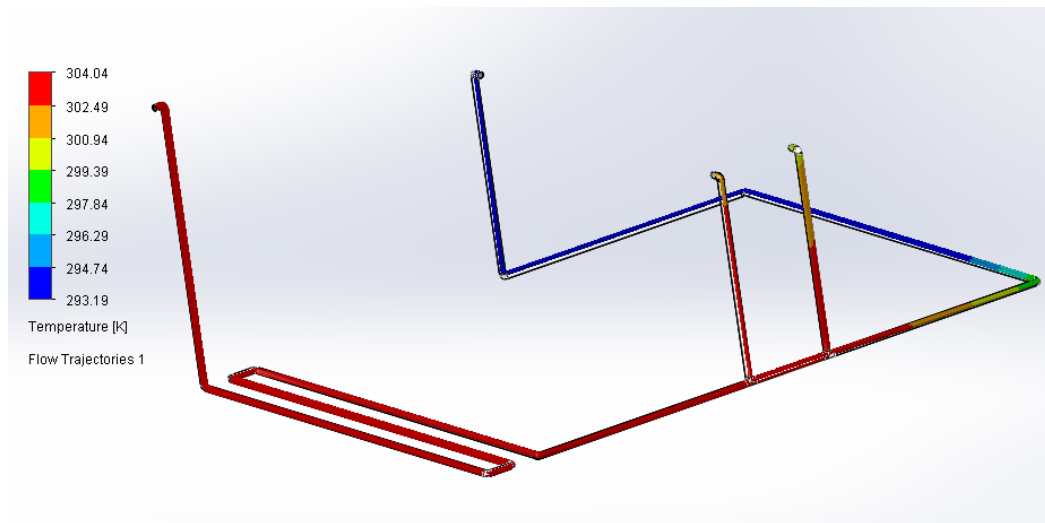
Figura 4-5. Comportamiento térmico del fluido al interior del ICTA según las condiciones de temperatura en Kelvin



Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks, Flow Simulation.

El fluido sigue su recorrido a lo largo de los ductos para finalmente ingresar a la vivienda a una temperatura de 293 K o 20 °C hasta el final del trayecto de la tubería instalada, es decir, el último punto de salida que se encuentra conectado a la sala – cocina de la vivienda.

Figura 4-6. Isométrico del comportamiento térmico del fluido al interior del ICTA



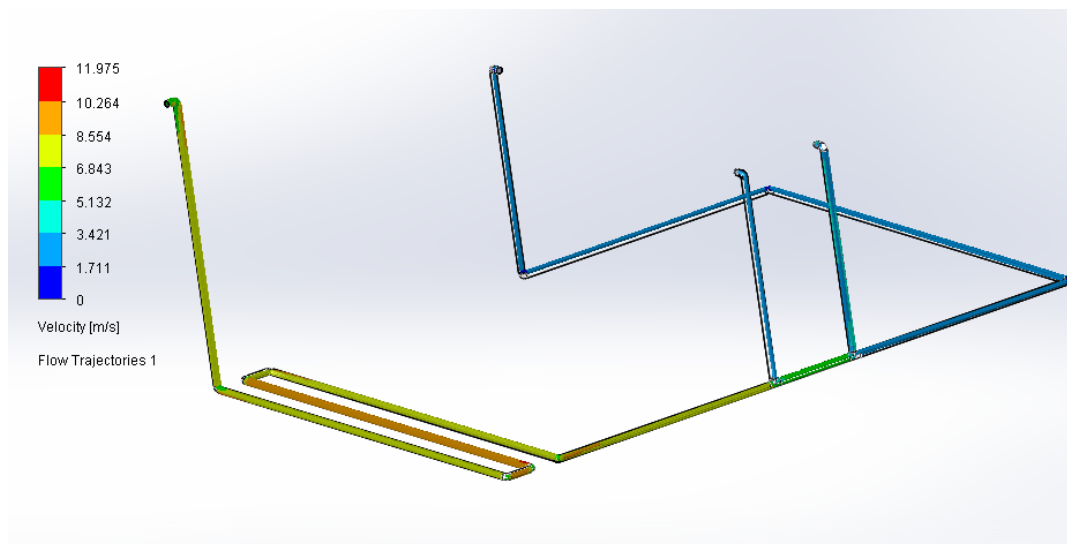
Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks, Flow Simulation.

En la Figura 4-6 podemos observar el isométrico de la configuración del sistema de intercambiador de calor tierra-aire, allí podemos observar el comportamiento del fluido desde su mayor temperatura de 304 K hasta una temperatura de 293 K. En los dos puntos de salida del aire, la cuales conectan a los dos dormitorios, estos presentan una mayor temperatura con respecto al último punto de salida, esto debido a la longitud de tubería instalada hasta este punto, allí podemos demostrar que a mayor longitud mayor será el intercambio de calor y la temperatura será menor. En los puntos de salida de los dos dormitorios se decide dejar la configuración tal como se mostró anteriormente, porque el uso del ICTA se realizará en las horas con temperatura más elevada en la ciudad, por ende, no es necesario una temperatura tan cercana a los rangos de confort (20 a 26 °C) en estos

dos espacios debido a la poca actividad en estas zonas. La temperatura en estos dos puntos oscila entre 299 y 300 K (26 y 27 °C).

Otros parámetros analizados en la simulación CFD del sistema de climatización fue la velocidad y la densidad del fluido, anteriormente, se mencionaba la necesidad de utilizar un forzador de aire que garantice el caudal masico del aire y una velocidad constante en el punto de captación de aire. En la figura 4-7 se observa el comportamiento de la velocidad al interior de los ductos, este, inicia con una velocidad entre 5,132 y 6,8 m/s debido a variaciones a la velocidad del aire al exterior del sistema. También se puede observar cómo esta velocidad decae a lo largo del sistema, de allí podemos concluir que entre más tiempo se encuentre el fluido al interior de los ductos mayor será la eficiencia de la transferencia de calor con la temperatura del suelo.

Figura 4-7. Isométrico ICTA comportamiento de la velocidad del fluido

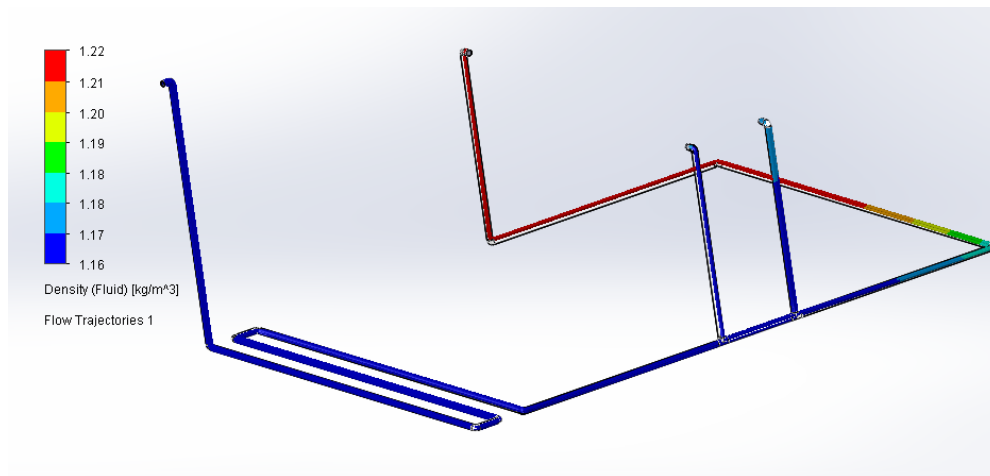


Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks, Flow Simulation.

Sabemos que la densidad de un fluido en este caso el aire varía de un sitio a otro y depende de varios factores, uno de estos factores es la temperatura. El aire caliente es

menos denso que el aire frío debido a que las moléculas más calientes tienen más energía. En la Figura 4-8 se observa de la simulación que a la entrada del aire este presenta una densidad entre 1,16 y 1,17 Kg/m^3 y a la salida del ultimo punto este tiene una mayor densidad con un valor entre 1,21 y 1,22 Kg/m^3 . De la simulación podemos concluir que el aire que ingresa al sistema ingresa con mayor energía que con la que sale del sistema.

Figura 4-8. Isométrico ICTA comportamiento de la densidad del aire



Fuente: Autor, 2022. Elaborado en SolidWorks, Flow Simulation.

En resumen, en la Tabla 4-1 podemos observar las variables y los resultados obtenidos de la simulación CFD del ensamblaje del ICTA, tales como, valor mínimo, máximo y promedio de temperatura, densidad mínima y máxima, flujo volumétrico y velocidad promedio del fluido.

Tabla 4-1. Resumen de resultados del ICTA**Esamblaje ICTA.SLDASM [Simulación [Predeterminado]]**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Minimum Total Temperature 4	[K]	289,9972	289,9969	289,9968	289,9972
GG Average Total Temperature 5	[K]	300,4528	299,6338	298,6954	300,4528
GG Maximum Total Temperature 6	[K]	304,0396	304,0860	304,0269	304,3444
GG Minimum Density (Fluid) 7	[kg/m ³]	1,1609	1,1612	1,1609	1,1619
GG Maximum Density (Fluid) 9	[kg/m ³]	1,2170	1,2170	1,2170	1,2170
GG Volume Flow Rate 10	[m ³ /s]	0,0363	0,0607	0,0363	0,0854
GG Average Velocity 12	[m/s]	5,7050	5,6919	5,6769	5,7050

Iterations []: 263
 Analysis interval: 33

Fuente: Flow Simulation, SolidWorks, 2022.

4.3 Análisis comparativo de resultados

Se han validado los resultados obtenidos del modelo de análisis térmico y los obtenidos en la simulación CFD con una configuración serpentina para un área total de 36 metros cuadrados. Partiendo de la plantilla de cálculos programada en Excel se analizará como cambian estos si las variables independientes del prototipo se ven afectadas.

En la figura 4-6 se mencionaba como la distancia total del intercambiador de calor afectaba la razón de transferencia de calor al interior del prototipo.

4.3.1 Longitud en el intercambiador de calor tierra-aire

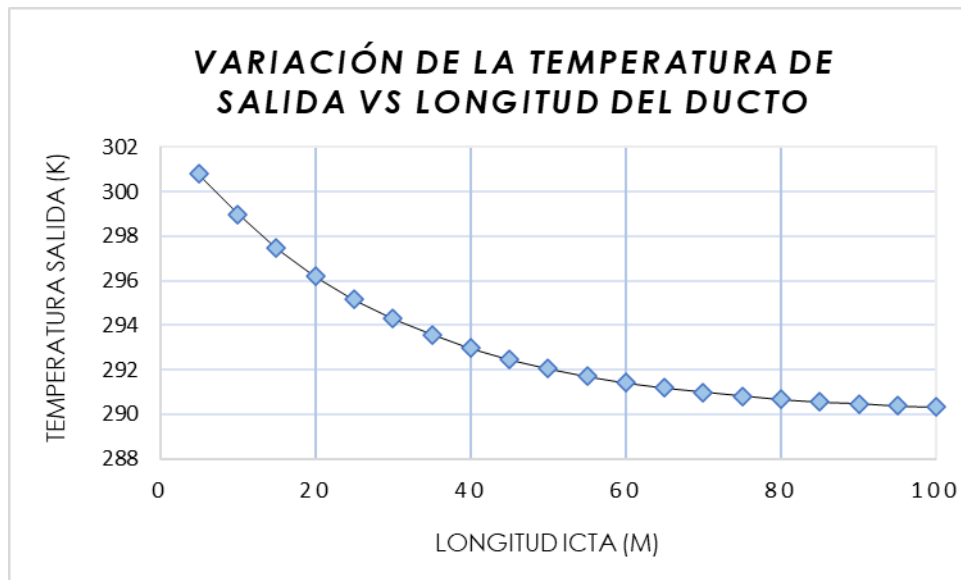
La longitud de los ductos es una variable que puede ser considerada independiente si se diseña a razón del área de la vivienda a climatizar. En la Tabla 4-2 se observan los resultados de la temperatura de salida cuando se cambia la longitud de configuración del ICTA y las demás variables se mantienen.

Tabla 4-2. Resultado de la temperatura de salida si varía la longitud del ICTA

	\emptyset (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	Tair,en (K)	Tsuelo (K)	Tair,sal (K)
1	0,0762	5	36,07	5	303	290	300,8045406
2	0,0762	10	36,07	5	303	290	298,9798537
3	0,0762	15	36,07	5	303	290	297,4633226
4	0,0762	20	36,07	5	303	290	296,2029055
5	0,0762	25	36,07	5	303	290	295,1553496
6	0,0762	30	36,07	5	303	290	294,2847065
7	0,0762	35	36,07	5	303	290	293,5610989
8	0,0762	40	36,07	5	303	290	292,9596952
9	0,0762	45	36,07	5	303	290	292,4598574
10	0,0762	50	36,07	5	303	290	292,044433
11	0,0762	55	36,07	5	303	290	291,6991661
12	0,0762	60	36,07	5	303	290	291,4122084
13	0,0762	65	36,07	5	303	290	291,1737126
14	0,0762	70	36,07	5	303	290	290,9754942
15	0,0762	75	36,07	5	303	290	290,8107513
16	0,0762	80	36,07	5	303	290	290,6738304
17	0,0762	85	36,07	5	303	290	290,5600329
18	0,0762	90	36,07	5	303	290	290,4654537
19	0,0762	95	36,07	5	303	290	290,3868472
20	0,0762	100	36,07	5	303	290	290,3215159

Fuente: Autor, 2022.

La temperatura final de salida varía a razón de la longitud, con las mismas condiciones de diámetro, velocidad, área y temperaturas ambientales y del suelo,

Figura 4-9. Variación de la temperatura de salida vs longitud del ducto

Fuente: Autor, 2022.

La Figura 4-9 muestra el comportamiento de la temperatura de salida vs la longitud del ducto, en esta grafica se muestra como a medida que aumenta la longitud, la temperatura disminuye, a su vez se evidencia un comportamiento asintótico cuando la longitud de los ductos es cada vez mayor. La temperatura se disminuye de manera exponencial a medida que se incrementa la configuración de los ductos.

4.3.2 Diámetro en el intercambiador de calor tierra-aire

El diseñador tiene la libertad de definir el sistema de climatización modificando las variables según el área y volumen a acondicionar. El diámetro dentro del modelo de análisis térmico es una variable independiente que afecta el comportamiento del ICTA. En la Tabla 4-4 y en la Figura 4-10 observamos el comportamiento de la temperatura final de salido en el ICTA cuando se opta por cambiar el diámetro de los ductos.

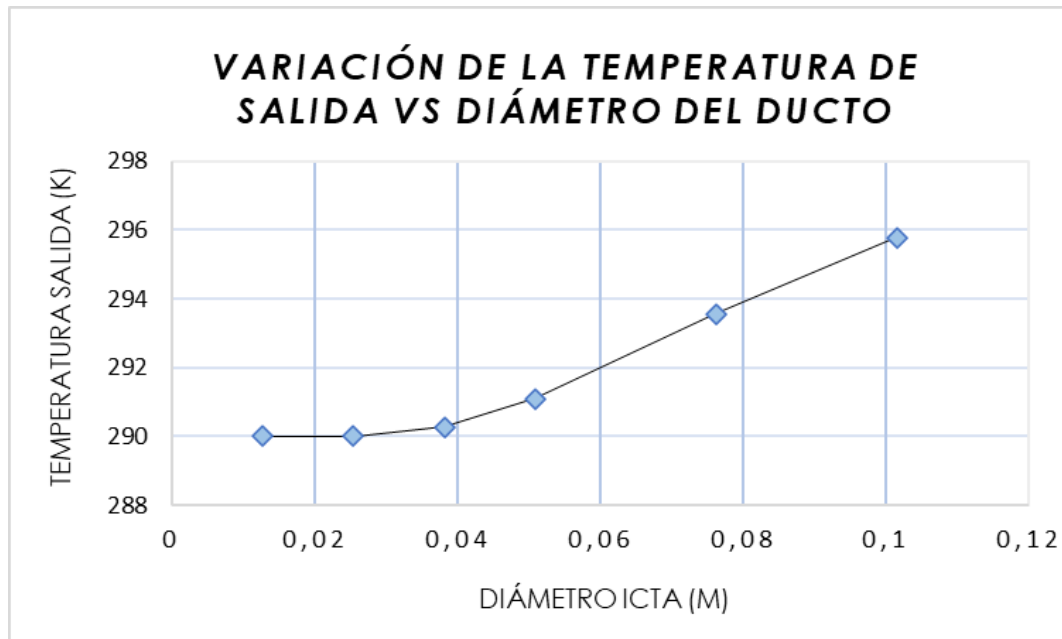
Tabla 4-3. Resultado de la temperatura de salida si varía el diámetro de los ductos del ICTA

	\varnothing (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	Tair,en (K)	Tsuelo (K)	Tair,sal (K)
1	0,0127	35	36,07	5	303	290	290
2	0,0254	35	36,07	5	303	290	290,0087995
3	0,0381	35	36,07	5	303	290	290,2603936
4	0,0508	35	36,07	5	303	290	291,0848037
5	0,0762	35	36,07	5	303	290	293,5610989
6	0,1016	35	36,07	5	303	290	295,7770681

Fuente: Autor, 2022.

Al ser una región mayor, el fluido tardará más tiempo en generar el intercambio de calor. Tanto la longitud como el diámetro de los ductos son valores que modifican el resultado del área de sección transversal de intercambio de calor.

Figura 4-10. Variación de la temperatura de salida vs diámetro del ducto



Fuente: Autor, 2022.

4.3.3 Velocidad en el intercambiador de calor tierra-aire

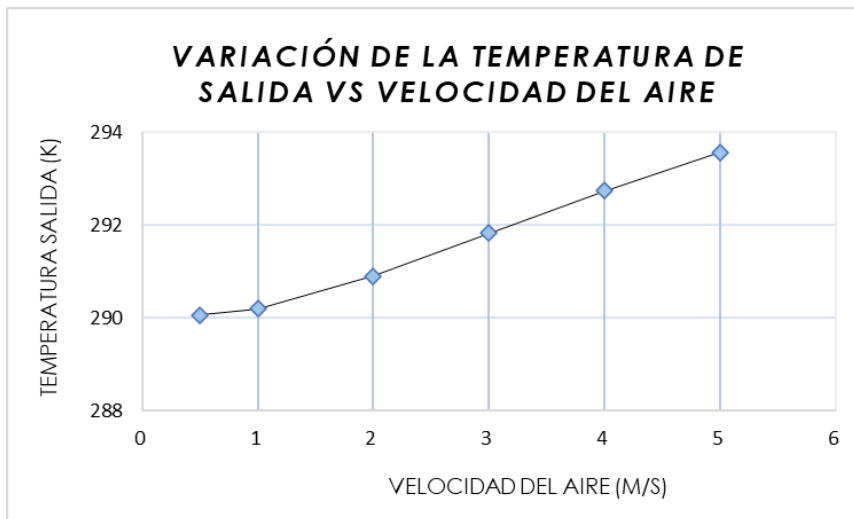
La velocidad del fluido (aire) para el prototipo es forzada, así mismo el sistema puede funcionar de manera natural sin la necesidad de implementar un inyector o forzador de aire. Esta variable medida modifica los valores de transferencia de calor del ICTA, entre menos tiempo el fluido permanezca al interior de los ductos menor será la razón de intercambio de calor. En la Tabla 4-4 y en la Figura 4-11 se evidencia el comportamiento de la velocidad del aire al interior de los ductos.

Tabla 4-4. Resultado de la temperatura de salida si varía la velocidad del aire al interior de los ductos del ICTA

	\varnothing (m)	L (m)	Área (m ²)	V (m/s)	Tair,en (K)	Tsuelo (K)	Tair,sal (K)
1	0,0762	35	36,07	0,5	303	290	290,0608739
2	0,0762	35	36,07	1	303	290	290,2008059
3	0,0762	35	36,07	2	303	290	290,9028051
4	0,0762	35	36,07	3	303	290	291,8236585
5	0,0762	35	36,07	4	303	290	292,7343477
6	0,0762	35	36,07	5	303	290	293,5610989

Fuente: Autor, 2022.

Figura 4-11. Variación de la temperatura de salida vs la velocidad del aire



Fuente: Autor, 2022.

Conclusiones

Se diseñó y modela un prototipo geotérmico de intercambiador de calor tierra-aire, el cual contribuye a la climatización de espacios al interior de viviendas, produciendo un diferencial de temperatura de 9,6, generando una disminución de 303 K a 293,4 K o 30 °C a 20,4 °C. Se reducen los consumos de energía eléctrica en comparación a los sistemas de climatización convencionales.

Se caracterizaron las variables de temperatura ambiente, temperatura de salida del ICTA, temperatura del suelo, área y volumen de la vivienda, flujo másico del aire, conductividad, capacidad y resistencia térmica del suelo, el aire y material. Dentro de los resultados se evidencia que estas variables juegan un papel importante para los cálculos del diseño, si existen modificaciones a la profundidad de instalación, la temperatura de este varía, viéndose reflejado en la temperatura final de climatización.

Establecer requerimientos técnicos para el diseño del prototipo permitió la selección del tubo de PVC como material principal, debido a su bajo costo comparado con el polipropileno o acero inoxidable, así como la necesidad de implementar un inyector de aire para lograr una velocidad de 5 m/s. Los resultados que se obtuvieron mediante el modelo de análisis térmico De Paepe & Janssens, y los cálculos realizados, corresponden a una eficiencia del 72% en el ICTA, una caída de presión de 165,68 Pa, una temperatura de salida de 20,41 °C o 293,56 K, un valor total de calor transferido de 248,16 W y un coeficiente de convección de 20,12 W/m²K.

En efecto, de los cálculos realizados para determinar el coeficiente global de intercambio de calor, se establece que la resistencia térmica del terreno tiene una mayor incidencia en los cálculos de calor total transferido y de la temperatura de salida, 72,18%.

Se concluye que la conductiva térmica de la tubería es mucho menor a la del suelo, en consecuencia, la temperatura de la pared del tubo es igual a la del suelo.

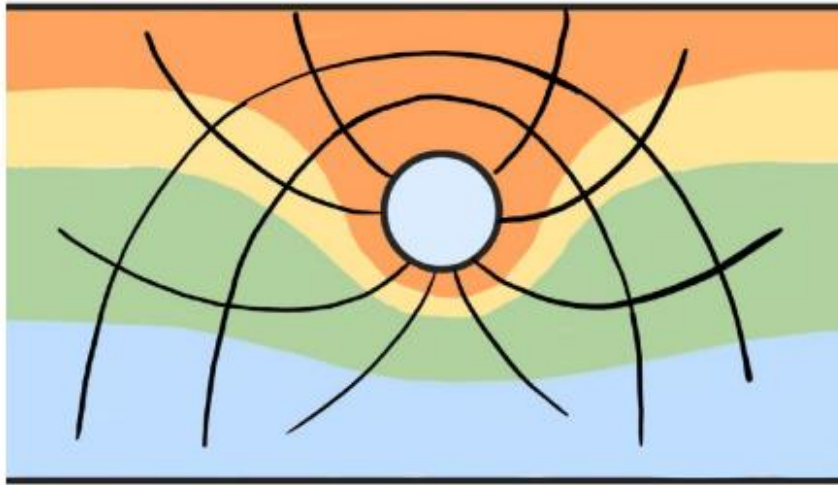
El modelo CFD es adecuado para simular el proceso de transferencia de calor de un ICTA, evidenciando un gradiente de temperatura a lo largo de la longitud de los ductos que oscila entre 303 K y 293 K, debido a la diferencia de temperatura entre el flujo de aire de entrada y de salida. Es de resaltar que estos gradientes de temperatura no se podrían identificar en estudios experimentales o simulaciones de modelos unidimensionales. Considerando este efecto, la velocidad osciló entre 5,705 m/s y 1,17 m/s, para la densidad del fluido de 1,22 kg/m³ y 1,16 kg/m³, respectivamente.

En conclusión, la implementación del prototipo es viable puesto que, está compuesto en su totalidad con tubería de PVC, la cual tiene un tiempo de vida útil de 20 años, por consecuente, reduce los impactos ambientales al no generar residuos durante este tiempo. Adicionalmente, los costos y tiempos de mantenimiento son mínimos en comparación a sistemas de climatización tradicionales, se reduce el consumo de energía eléctrica en 35% con ventilación forzada o un 100% con ventilación natural.

Anexos

ANEXO A. ANÁLISIS DE CÁLCULOS DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

Se ha realizado un análisis mediante resistencias térmicas de los tres componentes implicados en el intercambio de calor: el terreno, el conducto y el aire.



El esquema de este circuito térmico se puede observar en la siguiente figura, donde se muestra un esquema de las resistencias del sistema y los valores característicos:

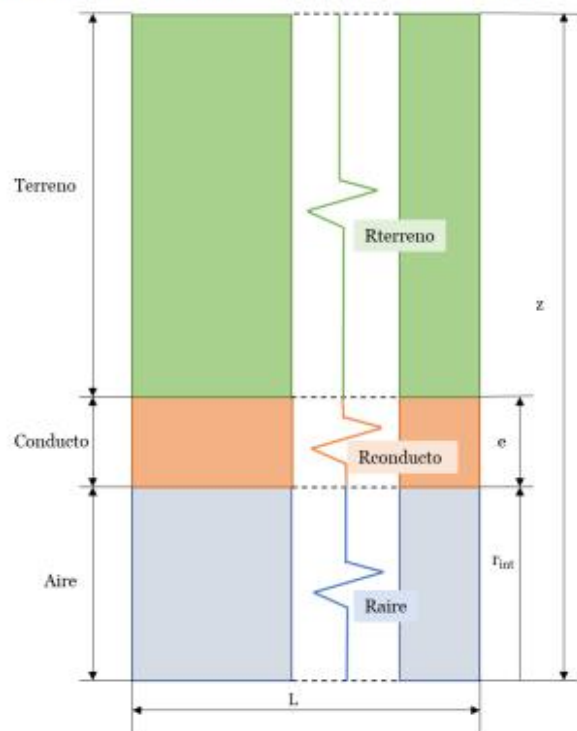


Figura 1 Esquema de resistencias térmicas de la instalación.

Resistencia térmica del terreno

La resistencia térmica del terreno se ha calculado mediante análisis 2D con factor de forma, en este caso, como un cilindro horizontal isoterma de longitud L enterrado en un medio semiinfinito.

$$\text{Resistencia térmica del terreno} \Rightarrow R_{t,terreno} = \frac{1}{F \cdot \lambda_{terreno}}$$

$$\text{Factor de forma} \Rightarrow F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{4z}{D}\right)} \text{ o } F = \frac{2\pi L}{\text{arcosh}\left(\frac{2z}{D}\right)}$$

Siendo:

F es el factor de forma [m]

$\lambda_{terreno}$ es la conductividad térmica del terreno [W/m·K]

L es la longitud del conducto [m]

z es la profundidad de enterramiento del conducto [m]

D es el diámetro del conducto [m]

Resistencia de conducción del conducto

El conducto se ha analizado mediante un análisis unidimensional, cuya resistencia térmica es la siguiente:

$$R_{conductor} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{conductor} \cdot L} \cdot \ln \frac{R_{int} + e}{R_{int}}$$

Siendo:

$\lambda_{conductor}$ es la conductividad térmica del conducto [W/K]

L es la longitud del conducto [m]

R_{int} es el radio interior del conducto [m]

e es el espesor del conducto [m]

Resistencia de convección del aire

La resistencia de convección del aire es la más compleja de todas puesto que se trata de convección forzada interior. Se ha realizado mediante un análisis unidimensional radial cuya resistencia térmica es la siguiente:

$$R_{conv,aire-tubo} = \frac{1}{h_{aire} \cdot A} = \frac{1}{h_{aire} \cdot (2\pi \cdot r \cdot L)}$$

Siendo:

h_{aire} es el coeficiente de convección del aire [W/m²]

A es la superficie de intercambio de calor [m²]

r es el radio del conducto [m]

L es la longitud del conducto [m]

ANEXO B. PLANTILLA DE CÁLCULOS ICTA REALIZADA EN EXCEL

	Valor	Unidades
VIVIENDA		
Área total	36,07	m ²
Altura vivienda	2,2	m
Volumen total	79,36	m ³
Renovaciones totales	7	R/h
Caudal total	139,58	m ³ /h
Caudal total a implementar	0,03877222	m ³ /s
ICTA		
Diametro	0,0762	m
Longitud	35	m
Número tubos	1	
TEMPERATURAS		
Temperatura de entrada	303	K
Temperatura del suelo	290	K
Temperatura de salida	298	K
AIRE		
Conductividad térmica	0,02625	W/Km
Densidad	1,145	Kg/m ³
Capacidad térmica	1007	J/KgK
Viscosidad dinámica	0,00001895	
Viscosidad cinemática	0,00001655	m ² /s
Difusividad térmica	0,00002277	m ² /s
SUELO		
Conductividad térmica	1,046	W/Km
TUBO		
Conductividad térmica	0,16	W/Km
valor pi	3,1416	
valor euler	2,7182	
Profundidad instalación	2,5	m
Radio interior tubo	0,0366	m
Espesor tubo	0,003	m

	Valor	Unidades
velocidad aire	5	m/s
caudal másico aire	0,026108164	Kg/s
Numero de reinolds	23021,14804	
Numero de prandtl	0,726833553	
Factor de fricción	0,025202695	
Número de nusselt	58,39966082	

coeficiente de convección	20,11799339	W/m ² K
Área sección transversal tubo	8,3786472	m ²
NTU	1,294919175	

Temperatura salida	293,5610989	K
Temp. Salida	20,41109885	°C
Temperatura media logaritmica	7,289401131	K
Calor total transferido	248,1648755	W

Eficiencia ICTA	72,60693189	%
-----------------	-------------	---

Caida de presión	165,6820853	Pa
Caida de presión especifica	127,9478198	Pa/NTU

Resistencia terreno	0,021201679	K/W
Resistencia tubo	0,002238989	K/W
Resistencia aire	0,00593255	K/W
Resistencia total	0,029373219	K/W
Coficiente int. Calor	4,063259497	W/m ² K

Factor de forma Rt	45,09184971	
--------------------	-------------	--

ANEXO C. TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	1.408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

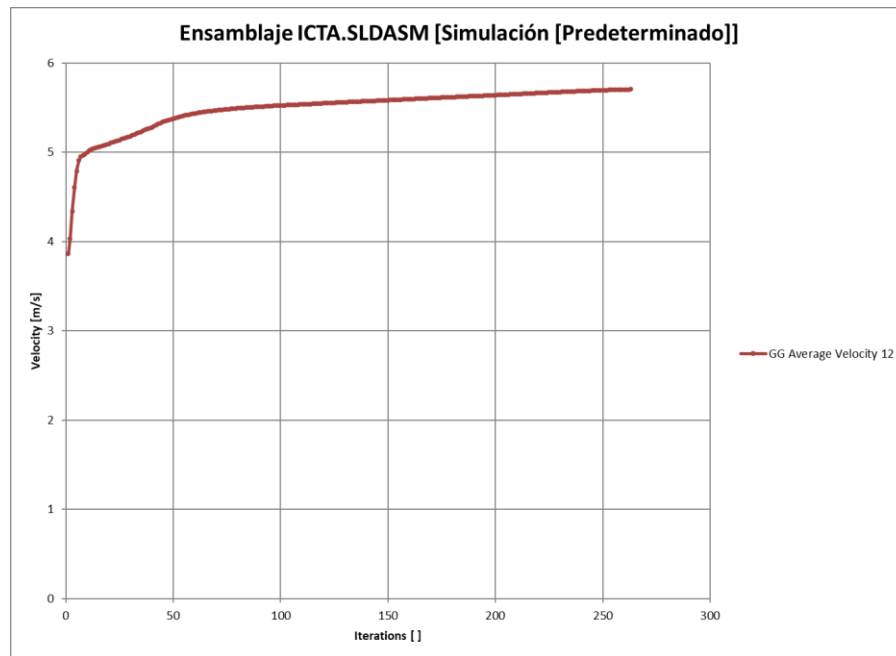
Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, F. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y F. Hebermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-6.

ANEXO D. LEGISLACIÓN COLOMBIANA QUE RIGUE LAS INSTALACIONES
GEOTÉRMICAS EN EL PAÍS

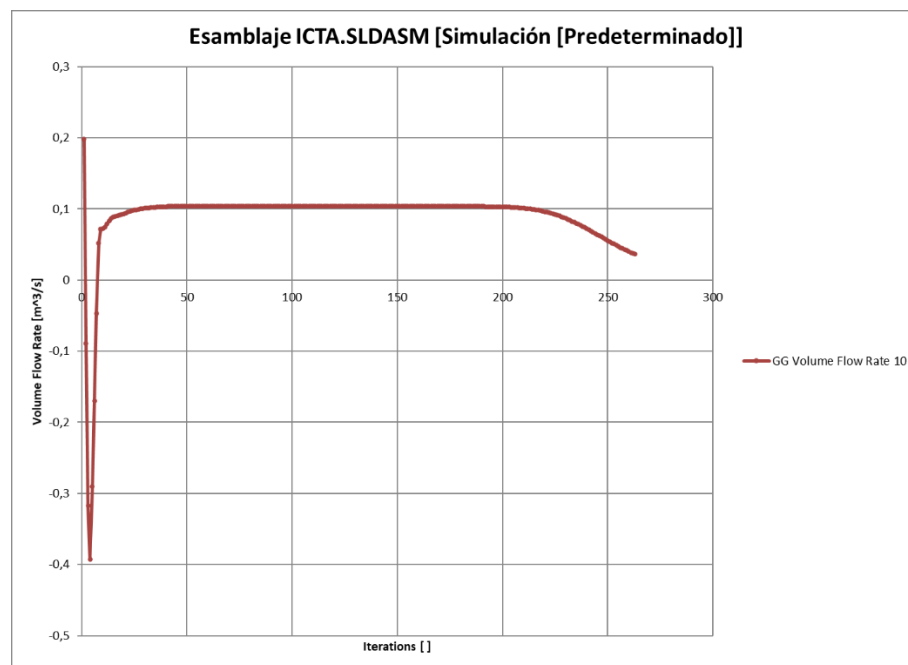
Ley	Descripción	Sistema Cerrado	Sistema Abierto
Ley 99 de 1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.	✓	✓
Ley 373 de 1997	Se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.		✓
Decreto 2811 de 1974	Se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	✓	✓
Decreto 1541 de 1978	Se definen las regulaciones para la explotación de las aguas subterráneas y obliga a la obtención de concesión para la explotación del Recurso Hídrico Subterráneo (RHS).		✓
Decreto 1594 de 1984 de Min-salud	Se define los procedimientos sancionatorios aplicables al RHS.		✓
Decreto 1076 de 2015	Se compila en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental.	✓	✓
Decreto 155 del 2004 del MAVDT	Se define la metodología para determinar la tasa por uso de las Aguas Subterráneas.		✓
Decreto 1640 de 2012	Se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones		✓
Resolución 815 de 1997 SDA	Se obliga a implementar un sistema de medición para la explotación del RHS.		✓

Resolución 250 de 1997 SDA	Se obliga a la determinación anual de los niveles estáticos y dinámicos y el monitoreo fisicoquímico de las aguas subterráneas.		✓
Resolución 1391 del 2003 SDA	Se adoptan los formatos que se deben diligenciar para adelantar trámites ante la SDA para obtención o prórroga de una nueva concesión de agua.		✓
Resolución 2173 de 2003	Se fijan las tarifas para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental.	✓	✓
Resolución 240 del 2004 del MAVDT	Se fija la tarifa mínima para el cobro de la tasa por uso.		✓
Resolución 1148 del 2005 de la SDA	Se acoge la tarifa mínima para aplicación en el Distrito.		✓
Resolución 5589 DE 2011	Se fija el procedimiento de cobro de los servicios de evaluación y seguimiento ambiental.	✓	✓
Acuerdo 10 de 1989	Se dictan normas para administrar las aguas de uso público en el área de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)		✓

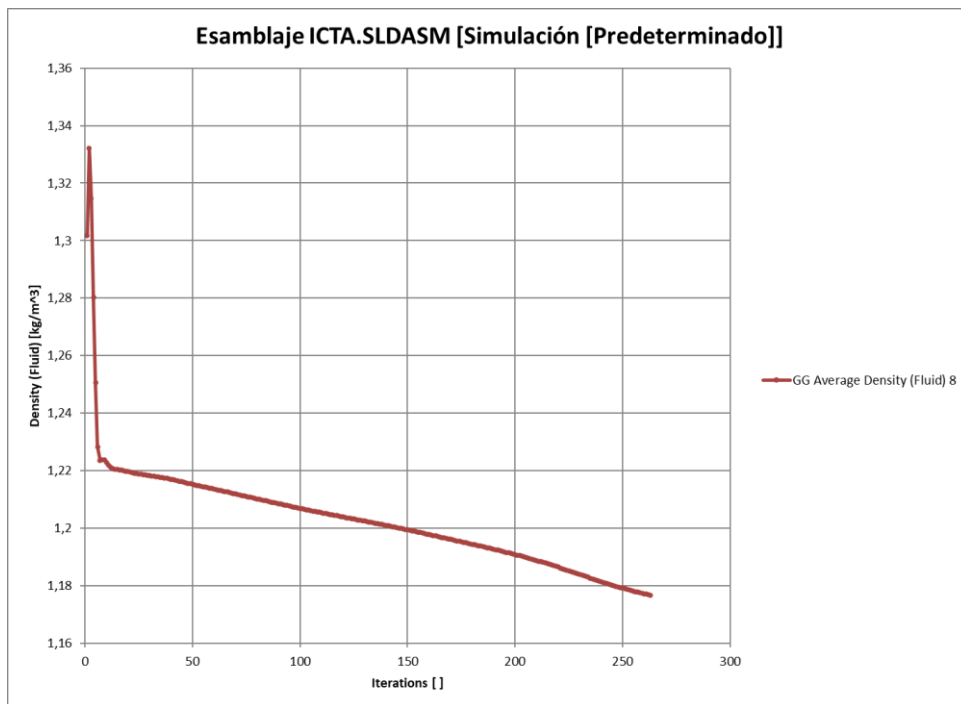
ANEXO E. RESULTADOS DE LAS ITERACIONES POR VARIABLES ANALIZADAS



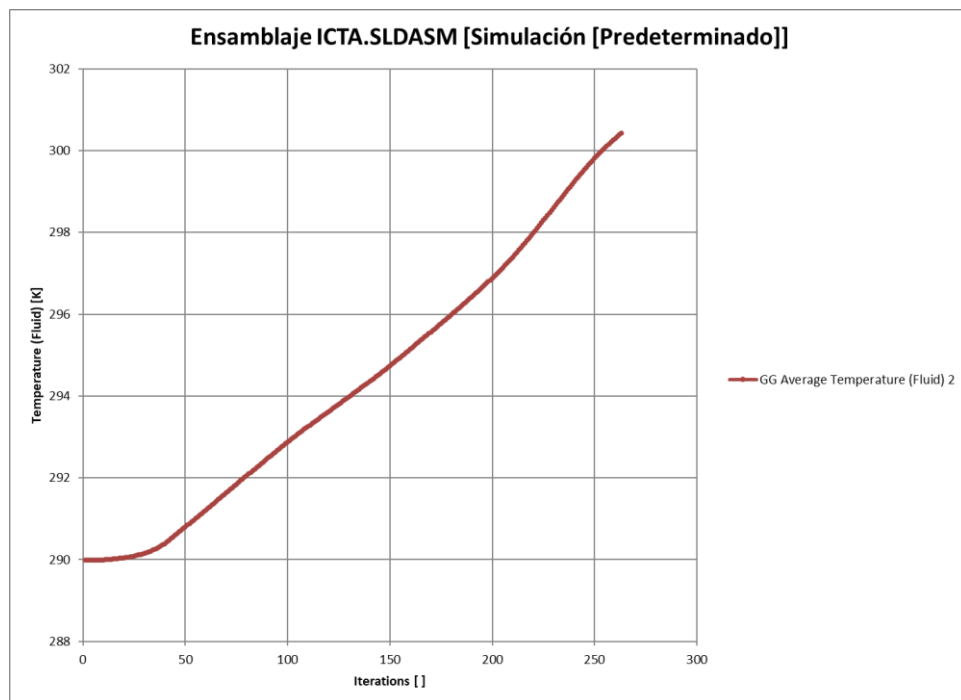
Grafica 1: Resultados iteraciones vs velocidad



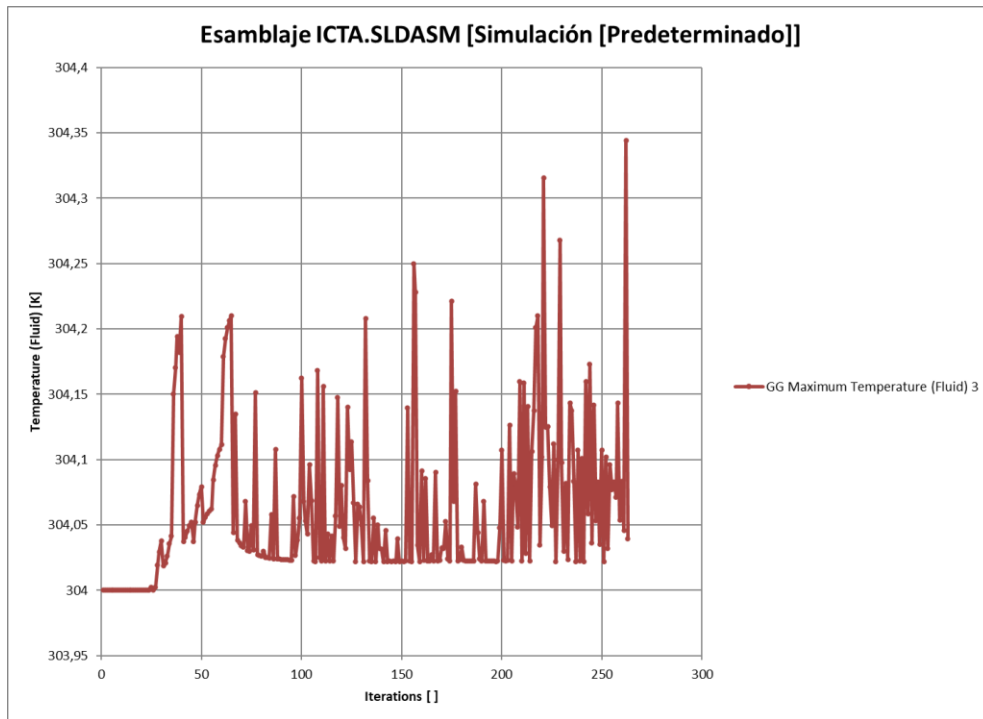
Grafica 2: Resultados iteraciones vs flujo volumétrico



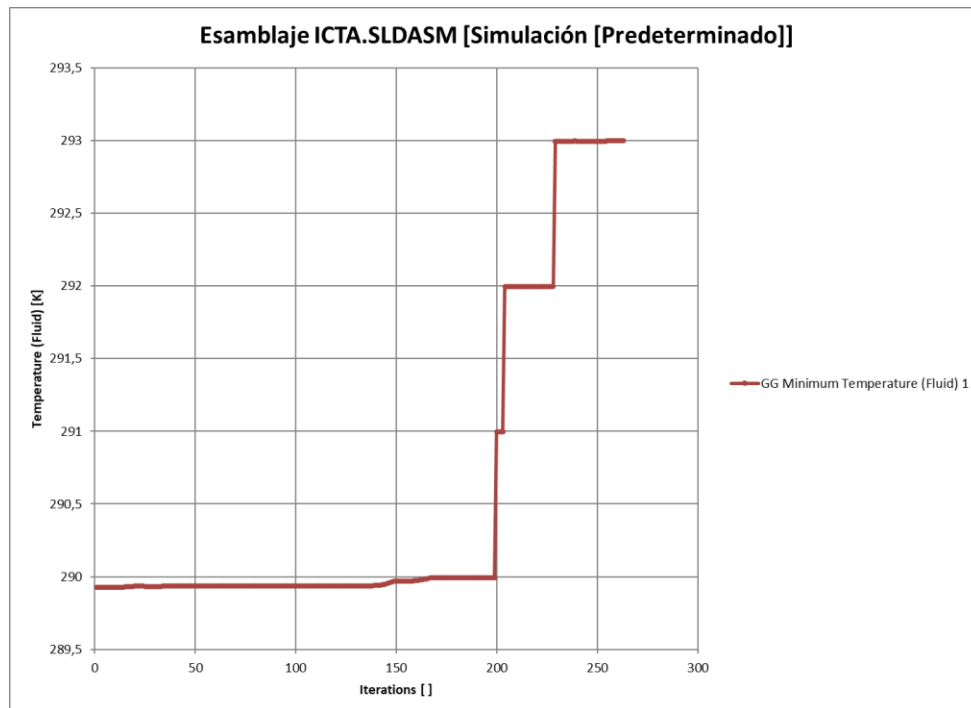
Grafica 3: Resultados iteraciones vs densidad



Grafica 4: Resultados iteraciones vs temperatura promedio

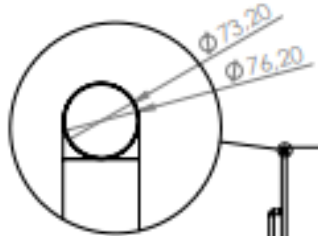


Grafica 5: Resultados iteraciones vs temperaturas máximas

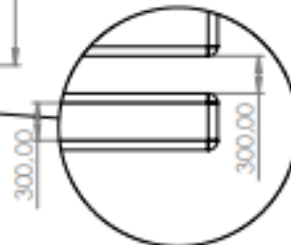
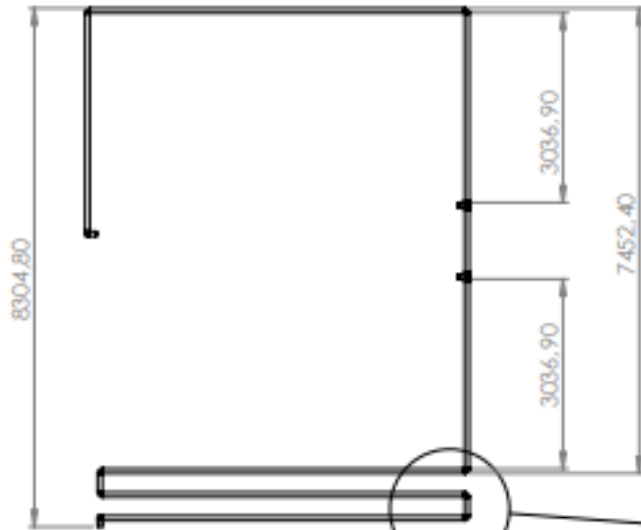
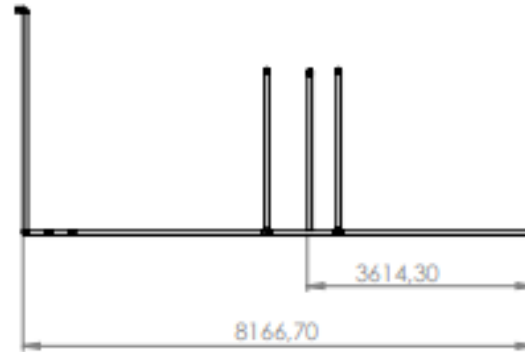
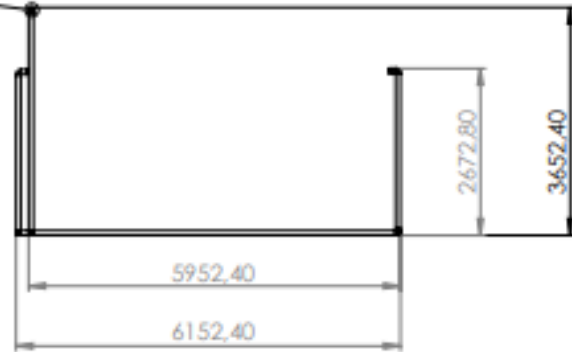


Grafica 6: Resultados iteraciones vs temperaturas mínimas

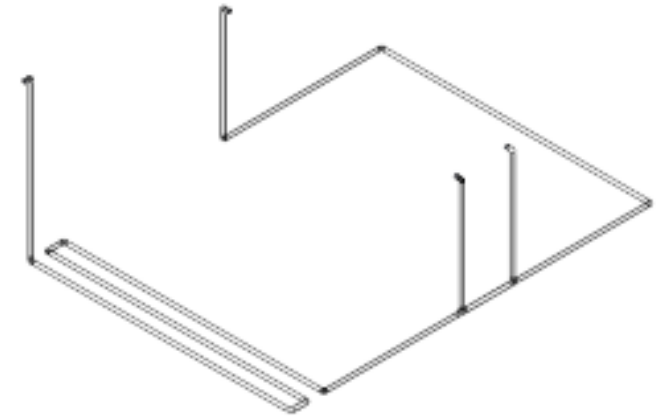
ANEXO F. REPRESENTACIÓN GRAFICA ENSAMBLAJE ICTA




DETALLE B
ESCALA 1 : 5



DETALLE A
ESCALA 1 : 40



Universidad 	Materia:	TIG - 2022	Dibujó:	Ángel David Valenzuela Ramírez
	Proyecto:	Ensamblaje ICTA	Carrera:	Ingeniería Mecánica
	Escala:	1:80	Observaciones:	Unidades en mm

Referencias Bibliográficas

- Acevedo Sánchez, A. M., & Arias Marín, G. (2017). *Estado Actual de la Producción de Energía Geotérmica en Colombia*. Manizales: Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD.
- ADCA, OLMJ, & PJLF. (2012). *Diseño de la automatización y control de un sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados para espacios interiores en el edificio de Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Aguirre Tapullima, C. D., & Ordoñez Chimbo, R. B. (2019). *ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA CLIMATIZACIÓN DE AMBIENTES MEDIANTE LA TÉCNICA DE POZO CANADIENSE*. San Juan Bautista: UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ.
- ARIAS HENAO, C. A. (2015). *POTENCIAL DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR TIERRA-AIRE PARA ACONDICIONAMIENTO DE AIRE EN DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS*. SEVILLA: UNIVERSIDAD DE SEVILLA.
- Avilés Jiménez, J. A. (2019). *DISEÑO DE CLIMATIZACIÓN APROVECHANDO ENERGÍA GEOTÉRMICA UTILIZANDO INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-TIERRA EN FINCA PRIMAVERA, PUEBLO NUEVO VIÑAS, SANTA ROSA*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Badii, M., Guillen, A., & Abreu, J. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation). *International Journal of Good Conscience 11(1)*, 141-155.
- Beatriz Yolanda, S. M. (2012). *"Energía geotérmica", Avances de ingeniería. Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas, vol 9*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI; Universidad Pontificia Comillas.
- Bottazzi, L. (2021). *Análisis de transferencia de calor en un intercambiador geotérmico para aplicaciones energéticas*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Bruntland. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. ONU: Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

- Cabanzón Labat, J. (2018). *DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR (Design and Analysis of a Heat Exchanger)*. CANTABRIA: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
- Cabezas, A. M. (2012). *EFICIENCIA ENERGÉTICA A TRAVÉS DE UTILIZACIÓN DE POZOS CANADIENSES CON EL ANÁLISIS DE DATOS DE UN CASO REAL "CASA POMARET"*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya – UPC.
- Carro Pérez, M. E., Peiretti, A., & Francisca, F. M. (2018). ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 22., 04.23-04.34.
- De Paepe, M., & Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings* 35, 389-397.
- DÍAZ GUEVARA, S. A., & VEGA PATIÑO, G. E. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS PARALELAS PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. DUITAMA: UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA.
- DÍAZ HERNÁNDEZ, H. P., AGUILAR CASTRO, K. M., & MACÍAS MELO, E. (2017). Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 1(2), 44-51.
- Energía y sociedad. (2020). *Manual de la energía: Energía y sociedad*. Obtenido de Insostenibilidad del sistema energético y vías de solución: https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-6-insostenibilidad-del-sistema-energetico-y-vias-de-solucion/#_ftn46
- Escudero, I. E. (2021). *Estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire. Implementación de un software de prediseño*. Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura; Universidad de Zaragoza.
- Escuer J. Brunat, L. (2008). *Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones. Pozos provenzales y técnicas emparentadas*. Lérida: Geoconsultores técnicos y ambientales.
- Fernández Álvarez, D. (2014). *PROTOTIPO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN PARA VIVIENDAS CON INTERCAMBIADOR DE CALOR AGUA-AIRE*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.

- Gil Linares, C., Carmona Alférez, R., Burgos Ortiz, C., & Jiménez, J. (2017). *Temperaturas extremas y salud. Como nos afectan las olas de calor y frio*. Madrid: Instituto de Salud Carlos III.
- Girodgeotermia. (2008). *Qué es la energía geotérmica*. Recuperado el 18 de marzo de 2022, de <https://girodgeotermia.com/que-es-la-energia-geotermica/>
- Gutierrez Soleibe, F. (2021). *Propuesta de instalación geotérmica somera a partir de bombas de calor para la climatización de espacios en la Universidad EIA*. Envigado: UNIVERSIDAD EIA.
- Hermelin, M. (2007). *Entorno natural de 17 ciudades de Colombia*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. Sexta Edición). Ciudad de México: McGraw-Hill; Interamericana editores S.A.
- Isgro, M. d. (2013). *CRISIS ENERGÉTICA MUNDIAL*. Comodoro Rivadavia: Colegio Universitario Patagónico.
- Llopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Losada Gomez, J. A., & Charry Celis, J. G. (2016). *Pozos provenzales para aplicación en climatización tipo confort*. Neiva: Universidad Antonio Nariño.
- Marc De Val, M. (2014). *Alternativas energéticas en la climatización*. València: Universitat Politècnica de València; Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.
- Mateus Valencia, A. C. (2016). Crisis Energética en Colombia. *TIA*, 4(2), 74-81.
- Mohamed El Ghazali Benhamza, A. B., & Moumami, N. (2017). An experimental and a numerical study of horizontal earth-air heat exchanger in a hot climate. *International Journal of Sustainable Engineering* 10:2, 82-89.
- Naoufel, B., Mohamed, O., Arezki, S., Louis, L., Messaoud, B., & Wahid, M. (2020). Numerical parametric study of a new earth-air heat exchanger configuration designed for hot and arid climates. *International Journal of Green Energy* 17:2, 115-126.
- Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática*. Madrid: Editorial Munílla-Lería.

- Orozco Mendoza, A. V. (2020). *Diseño de un intercambiador tierra-aire, para el catas, realizando una simulación energética en design-builder*. San Juan del Río: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Peiretti, A. S. (2017). *ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO*. Cordoba: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.
- Pinilla Rodríguez, J. A. (16 de Noviembre de 2019). *Energy Management Magazine*. Obtenido de El problema energético mundial. Energías renovables y cambio climático: <https://e-management.mx/2019/11/16/el-problema-energetico-mundial-energias-renovables-y-cambio-climatico/#:~:text=El%20mundo%20se%20encuentra%20en,uso%20representa%20repercusiones%20ambientales%20indeseables>.
- REHAU Unlimited Polymer Solutions. (2016). *INTERCAMBIADOR AIRE-TIERRA AWADUKT THERMO, VENTILACIÓN SOSTENIBLE EN EDIFICIOS DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO*. Barcelona: REHAU Quality.
- RODRÍGUEZ LEGUIZAMON, A. G. (2021). *ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA VIVIENDAS EN CÓRDOBA*. CÓRDOBA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.
- Rodriguez, A. D., Eberhardt, G. J., Chiarella, P., & Tejada, E. (2018). VIABILIDAD Y PERTINENCIA DE LOS SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL POR GEOTERMIA DE BAJO COSTO EN EL ÁMBITO DE LA CIUDAD DE SANTA FE. *CRETA*, 608-618.
- Rojas, A., Zúñiga, O., Sánchez de Prager, M., Pérez, J., & Gascó, J. M. (2006). Conductividad térmica del suelo, materia orgánica, actividad y biomasa microbianas en sistema de cultivo de maracuyá en Toro, Valle del Cauca. *ACTA AGRON (COLOMBIA)* vol. 56, 17-21.
- Santilli, F. A. (2014). *Energía Geotérmica de Baja Entalpía: Comprobación de presencia y análisis conceptual de aprovechamiento*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Sobarchkin, D. A. (2013). *Base Numérica de CFD integrada en CAD*. NAFEMS world congress.
- Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). *DEFINICION E INFORMACION DE ENERGIAS RENOVABLES*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Thain, I., Reyes, A., & Hunt, T. (2006). *A practical guide to exploiting low temperature geothermal resources*. GNS Science Report 2006/09. 76p.
- UPME. (Diciembre de 2020). *Demanda y eficiencia energética*. Obtenido de Proyecciones de demanda:
<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Proyecciones-de-demanda.aspx#:~:text=El%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica,negativo%20desde%20el%20a%C3%B1o%202000>.
- Voos, G. E., Brondino, A., Berli, M., & Di Paolo, J. (2018). ALGORITMO PARA CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN EFICIENTES MEDIANTE TUBOS ENTERRADOS. *GIMEF Departamento de Ingeniería Industrial Facultad Regional Santa Fe; Universidad Tecnológica Nacional*, 11.
- ÇENGEL, Y. A., & John M., C. (2006). "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones". McGraw-Hill.