

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN
MODELAMIENTO NUMÉRICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE TIERRA
PARA EL ENFRIAMIENTO DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA CIUDAD DE
VILLAVICENCIO.**



Por:
Estefania Perdomo Gutierrez



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2024**

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN
MODELAMIENTO NUMÉRICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE
TIERRA PARA EL ENFRIAMIENTO DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA
CIUDAD DE VILLAVICENCIO.**



Por:
Estefania Perdomo Gutierrez

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de
Ingeniero Mecánico

Aprobado por:
Ing. Gilberto Andrés Jurado Fitatá, M.S.
Director

Ing. Brayan Andrés Rodríguez Herreño, M.S.
Codirector

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2024**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray Álvaro José Arango Restrepo, O.P.
Rector General

Fray Mauricio Antonio Cortés Gallego, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Seccional Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón, M.S.
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Handel Andrés Martínez Sarache, Ph.D.
Decano Facultad de Ingeniería Mecánica

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi familia, el mayor regalo de mi vida, mi refugio y mi fuente infinita de motivación.

A mi madre Yaneth y mi padre Reinaldo, cuyo amor incondicional y ejemplo de esfuerzo me han enseñado que no hay sueños imposibles. Ustedes son la raíz de todo lo que soy y de todo lo que espero ser. Gracias por cada sacrificio, por cada palabra de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mí misma. Su fe en mí ha sido el faro que ha guiado mi camino, demostrándome que con dedicación y constancia no existen obstáculos insuperables. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi hermano Jainover, mi cómplice de vida, mi amigo y mi mayor inspiración. Tu valentía, perseverancia y determinación son un ejemplo que admiro profundamente. Tu apoyo constante y motivación ha sido una luz que me ha guiado incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser esa presencia que siempre me impulsa a dar lo mejor de mí, incluso cuando el camino parece incierto.

A ustedes, mi familia, dedico este logro con gratitud infinita. Porque en cada paso de este camino, he llevado conmigo su amor, su confianza y su inquebrantable apoyo. Ustedes son mi motor, mi fortaleza y mi razón para soñar más alto y luchar con más fuerza.

Los amo y estaré eternamente agradecida.

RESUMEN

El uso de sistemas de enfriamiento, como los aires acondicionados, se ha intensificado en los últimos años. Esta tendencia, impulsada por la demanda de confort térmico en climas cálidos y tropicales, ha generado un aumento en el consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, los sistemas de enfriamiento tradicionales suelen utilizar refrigerantes que, a pesar de las regulaciones existentes, todavía tienen un impacto negativo en el medio ambiente.

Colombia se destaca por tener una de las matrices de generación eléctrica más limpias a nivel mundial, con un 68% de su energía proveniente de fuentes renovables, de las cuales la energía hidráulica representa la mayor contribución. Sin embargo, la dependencia de la energía hidráulica limita la generación debido a sequías que afectan los embalses, lo que aumenta el uso de la generación térmica para suplir la demanda. Los sistemas de enfriamiento convencionales representan el 48% del consumo eléctrico mensual promedio de 157 kWh de los hogares colombianos, incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos energéticos. Esto resalta la necesidad de implementar alternativas de enfriamiento más eficientes y sostenibles, que reduzcan tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como los costos energéticos.

Como alternativa a las fuentes energéticas tradicionales y con el fin de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, se ha incrementado el uso de energías renovables como la solar, eólica, hidráulica y geotérmica a nivel mundial; y que al diversificar las fuentes de energía en el país, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles proporcionando sostenibilidad energética. En particular, la energía geotérmica es una alternativa sostenible en aplicaciones de enfriamiento. Los intercambiadores de calor aire tierra (ICTA), son una tecnología que aprovecha el calor natural de la tierra para reducir la temperatura del aire exterior que circula en un conjunto de ductos enterrados en el suelo, disminuyendo significativamente el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los sistemas de enfriamiento tradicionales.

La implementación de un ICTA en la ciudad de Villavicencio puede ser una alternativa a la alta contaminación ambiental, producto del uso desmesurado para la refrigeración de espacios habitados. Particularmente, este trabajo se centra en el estudio numérico de un ICTA para una vivienda unifamiliar con el fin de obtener el comportamiento del sistema bajo las condiciones climáticas y las configuraciones geométricas a las que estaría sometido, las cuales se simularon en el software de dinámica de fluidos computacional Ansys fluent y se determinó que la configuración en serpentín con una longitud de 30 m y una tubería en PVC de 6" disminuye la temperatura del aire que se dispersaría en la vivienda, usando la menor cantidad de recursos y obteniendo las menores pérdidas de presión.

Palabras Clave: Intercambiador de calor aire tierra, dinámica de fluidos computacional, enfriamiento pasivo, energía geotérmica, energía renovable, ahorro energético.

ABSTRACT

The use of cooling systems, such as air conditioners, has intensified in recent years. This trend, driven by the demand for thermal comfort in hot and tropical climates, has led to an increase in energy consumption and greenhouse gas emissions. In addition, traditional cooling systems often use refrigerants that, despite existing regulations, still have a negative impact on the environment.

Colombia stands out for having one of the cleanest electricity generation matrices worldwide, with 68% of its energy coming from renewable sources, of which hydropower represents the largest contribution. However, the dependence on hydropower limits generation due to droughts that affect reservoirs, which increases the use of thermal generation to meet demand. Conventional cooling systems account for 48% of the average monthly electricity consumption of 157 kWh of Colombian households, increasing greenhouse gas emissions and energy costs. This highlights the need to implement more efficient and sustainable cooling alternatives that reduce both greenhouse gas emissions and energy costs.

As an alternative to traditional energy sources and in order to mitigate greenhouse gas emissions, the use of renewable energies such as solar, wind, hydraulic and geothermal has increased worldwide; and by diversifying energy sources in the country, dependence on fossil fuels is reduced, providing energy sustainability. In particular, geothermal energy is a sustainable alternative in cooling applications. Air-to-ground heat exchangers (ICTA) are a technology that takes advantage of the natural heat of the earth to reduce the temperature of the outside air that circulates in a set of ducts buried in the ground, significantly reducing energy consumption and greenhouse gas emissions compared to traditional cooling systems.

The implementation of an ICTA in the city of Villavicencio can be an alternative to the high environmental pollution caused by the excessive use of air conditioning for cooling inhabited spaces. In particular, this work focuses on the numerical study of an ICTA for a single-family home in order to obtain the behavior of the system under the climatic conditions and geometric configurations to which it would be subjected, which were simulated in the computational fluid dynamics software Ansys fluent and it was determined that the coil configuration with a length of 30 m and a 6" PVC pipe reduces the temperature of the air that would be dispersed in the home, using the least amount of resources and obtaining the lowest pressure losses.

Key Word: *Ground air heat exchanger, computational fluid dynamics, passive cooling, geothermal energy, renewable energy, energy savings.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	15
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
3.	JUSTIFICACIÓN	19
4.	OBJETIVOS	20
4.1.	OBJETIVO GENERAL	20
4.1.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5.	ALCANCE	21
6.	MARCO DE REFERENCIA	22
6.1.	MARCO TEÓRICO.	22
6.1.1.	INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE TIERRA	22
6.1.1.1.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ICTA	22
6.1.1.2.	LEYES DE LA TERMODINÁMICA	22
6.1.1.3.	FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS	23
6.1.2.	TEMPERATURA DEL SUELO.	26
6.1.3.	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).	28
6.1.4.	DESEMPEÑO ENERGÉTICO	31
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	31
6.2.1.	ENERGÍA GEOTÉRMICA	31
6.2.1.1.	TIPOS DE GEOTERMIA	32
6.2.1.2.	PROPIEDADES GEOTÉRMICAS DEL SUELO	33
6.2.2.	CONFIGURACIONES DE ICTA	33
6.2.3.	CRITERIOS DE DISEÑO	35
6.2.4.	MATERIAL DEL DUCTO	36
6.2.5.	DIMENSIONES DEL SISTEMA.	36
6.2.6.	MANTENIMIENTO DEL SISTEMA ICTA	37
6.3.	ESTADO DEL ARTE	37
6.4.	MARCO NORMATIVO	42
7.	METODOLOGÍA	43
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	43
8.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	46
8.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA VIVIENDA	46
8.2.	CAUDAL DEL AIRE A ENFRIAR.	48
8.3.	CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTERNAS	49
8.4.	TEMPERATURA DEL SUELO.	53
8.5.	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ICTA	55
8.6.	DIÁMETRO REQUERIDO PARA EL SISTEMA	56
8.7.	CONDICIONES DEL SISTEMA A ESTUDIAR	56
8.8.	CÁLCULO TEÓRICO PARA DETERMINAR LAS DIMENSIONES DEL ICTA.	58
8.9.	SIMULACIÓN DEL ICTA EN ANSYS FLUENT	59
8.9.1.	DISEÑO CAD	59
8.9.2.	PARÁMETROS PARA EL MALLADO	62
8.9.3.	MALLADO DEL MODELO	64

8.9.4. TEMPERATURA DEL AIRE EN LA SALIDA DE LOS SISTEMAS SIMULADOS	68
8.9.4.1. MODELADO DEL ICTA PARA LA CONFIGURACIÓN 1	68
8.9.4.2. MODELADO DEL ICTA PARA LA CONFIGURACIÓN 2.....	70
8.10. COMPARACIÓN RESULTADOS EES Y ANSYS FLUENT.	73
8.11. CAÍDA DE PRESIÓN EN LOS MODELOS	75
8.12. INVERSIÓN DE MATERIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.	77
8.14. COMPONENTES DEL SISTEMA.	79
8.14.1. SELECCIÓN DEL VENTILADOR.....	82
8.15. SELECCIÓN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	84
8.16. CONSUMO ENERGÉTICO.....	85
9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86
9.1. CONCLUSIONES	86
9.2. TRABAJOS FUTUROS.....	88
10. BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de energía geotérmica	33
Tabla 2. Materiales de mayor uso en ICTA.....	36
Tabla 3. Condiciones de la vivienda y suelo	47
Tabla 4. Renovaciones de aire y caudal necesario.....	48
Tabla 5. Renovaciones de aire de acuerdo con la ASHRAE	48
Tabla 6. Características de la estación meteorológica seleccionada.....	49
Tabla 7. Temperatura media, mínima y máxima en Villavicencio año 2022	50
Tabla 8. Temperatura mínima, promedio y máxima en diferentes profundidades del suelo.....	54
Tabla 9. Temperatura del suelo a 10 m de profundidad.....	55
Tabla 10. Velocidad y diámetro requerido	56
Tabla 11. Propiedades del aire a 1 atm a 20°C.	57
Tabla 12. Propiedades de tubería PVC comercial para su estudio numérico	57
Tabla 13. Diámetro de tubería seleccionada.....	57
Tabla 14. Longitudes para evaluar en cada configuración.....	58
Tabla 15. Tipo de flujo en la tubería	58
Tabla 16. Condiciones climáticas para evaluar el ICTA.....	58
Tabla 17. Resultados calculo teórico configuración 1.....	59
Tabla 18. Resultados calculo teórico configuración 2.....	59
Tabla 19. Dimensiones y condiciones iniciales para la configuración 1 y 2	63
Tabla 20. Tamaño de mallado para cada configuración	63
Tabla 21. Modelos de turbulencia RANS más comunes.....	64
Tabla 22. Caída de presión en la configuración 1.....	76
Tabla 23. Caída de presión en la configuración 2.....	76
Tabla 24. Costo de material para las longitudes evaluadas en la configuración 1.....	77
Tabla 25. Costo de material para las longitudes evaluadas en la configuración 2.....	78
Tabla 26. Características de los ventiladores industriales	81
Tabla 27. Ventiladores seleccionado	82
Tabla 28. Comparación de ventiladores para el sistema	83
Tabla 29. Capacidad de refrigeración por área según el fabricante Samsung	84
Tabla 30. Consumo de energía del aire acondicionado	85
Tabla 31. Consumo de energía del ventilador seleccionado.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de consumo energético en los hogares colombianos en el 2015	17
Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible relacionados al proyecto	19
Figura 3. Conductividades y capacidades térmicas de diferentes tipos de suelos.	28
Figura 4. Trayectoria abierta y cerrada en los sistemas de ICTA	34
Figura 5. Configuración directa (anillo).	34
Figura 6. Configuración serpentín.....	35
Figura 7. Configuración tichelmann	35
Figura 8. Disposición del sistema ICTA para un hospital de Panamá.....	38
Figura 9. Disposición de un diseño ICTA para un clima cálido-húmedo	39
Figura 10. Disposición de un diseño ICTA para su posterior estudio numérico	40
Figura 11. Disposición Techelman en Z y U para evaluar su rendimiento mediante análisis experimental y numérico.....	40
Figura 12. Disposición Techelman en U para evaluar su rendimiento en un edificio residencial.	41
Figura 13. Disposición final en serpentín	41
Figura 14. Metodología para desarrollar el objetivo 1.....	43
Figura 15. Metodología para desarrollar el objetivo 2.....	44
Figura 16. Metodología para desarrollar el objetivo 3.....	45
Figura 17. Ubicación geográfica de la vivienda	46
Figura 18. Condiciones físicas de la vivienda	47
Figura 19. Histograma de temperatura de Villavicencio en el año 2022	50
Figura 20. Grafica de caja de la temperatura en Villavicencio en el año 2022.....	51
Figura 21. Distribución de temperatura en el rango del promedio mensual.	52
Figura 22. Distribución de temperatura en un rango de 21 a 27 °C.	52
Figura 23. Variación térmica en diferentes profundidades.	54
Figura 24. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 18 metros.....	60
Figura 25. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 30 metros.....	60
Figura 26. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 42 metros.....	61
Figura 27. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 32 metros.....	61
Figura 28. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 48 metros.....	62
Figura 29. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 60 metros.....	62
Figura 30. Malla configuración 1 para su estudio numérico.....	65
Figura 31. Malla configuración 2 para su estudio numérico	66
Figura 32. Sensibilidad de malla configuración 1.....	66
Figura 33. Sensibilidad de malla configuración 2.....	67
Figura 34. Temperatura del sistema para 18 m de longitud en la configuración 1.	68
Figura 35. Temperatura del sistema para 30 m de longitud en la configuración 1.	68
Figura 36. Temperatura del sistema para 42 m de longitud en la configuración 1.	69

Figura 37. Comparación de las condiciones propuestas con la temperatura de salida del aire para la configuración 1.....	70
Figura 38. Temperatura del sistema para 32 m de longitud en la configuración 2.	71
Figura 39. Temperatura del sistema para 48 m de longitud en la configuración 2.	71
Figura 40. Temperatura del sistema para 60 m de longitud en la configuración 2.	72
Figura 41. Comparación de las condiciones propuestas con la temperatura de salida del aire para la configuración 2.....	73
Figura 42. Resultados teóricos y simulados para la configuración 1	74
Figura 43. Resultados teóricos y simulados para la configuración 2	75
Figura 44. Sistema de impulsión mecánica y pasiva.	80
Figura 45. Formas de instalación para una renovación de aire apropiada.....	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Temperatura promedio en VVC descargados de la base de datos del IDEAM.....	96
Anexo 2 Temperatura del suelo a diferentes profundidades diaria.....	105
Anexo 3 Cálculo teórico que se aplica para la configuración 1 y 2 en el software EES.	114
Anexo 4 Resultados sensibilidad de malla configuración 1 y 2.....	115
Anexo 5 Parametrización del modelo numérico ANSYS fluent para las iteraciones.	116
Anexo 6 Grafica de residuales para la configuración 1 y 2.....	120
Anexo 7 Ficha técnica ventiladores seleccionado.....	121
Anexo 8. Curvas de operación.....	127
Anexo 9 Costo Aires acondicionados seleccionados.	129

1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del uso de fuentes fósiles para la generación de electricidad, se liberan gases de efecto invernadero que provocan un aumento del calentamiento global. Actualmente, la necesidad de satisfacer la demanda energética de manera eficiente y sostenible impulsa el desarrollo de alternativas que aprovechan los recursos naturales renovables para la generación eléctrica. Estas soluciones no solo optimizan el uso de los recursos disponibles, sino que minimizan el impacto ambiental asociado con las fuentes tradicionales de energía.

Durante los últimos años, la demanda energética a nivel mundial ha aumentado significativamente convirtiéndose en una problemática de alta prioridad. En 2019, la generación eléctrica mundial estuvo dominada por fuentes de combustibles fósiles que aportaron un 63% del total, mientras que solo el 27% de la demanda energética mundial fue cubierta por fuentes renovables y el 10% con nuclear [1].

De acuerdo con lo anterior, se requiere implementar diferentes estrategias para mitigar el daño ambiental, es por esta razón que 196 países miembros de la ONU generaron 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas proyectadas hasta el 2030 de orden internacional, los cuales entraron en vigor el 1 de enero del 2016. Uno de los objetivos es generar una transición energética, debido a la generación de energía actual, puesto que el 60% del cambio climático se debe a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial [2].

El acuerdo se da con el propósito de mantener el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C [5]. Las energías renovables se han implementado desde las últimas décadas y es obtenida mediante el aprovechamiento de fuentes naturales tales como el agua, el viento y el sol principalmente; en 2019 la inversión en energías renovables incremento a 288.900 millones de dólares, más del triple destinado al uso de combustibles fósiles [2].

En Latinoamérica, el 58% de la electricidad proviene de fuentes renovables, principalmente mediante energía hidráulica. Un ejemplo destacado es Colombia, el sexto país más limpio en términos energéticos, donde el 68% de su matriz eléctrica proviene de fuentes renovables, con una significativa contribución de la energía hidráulica. Actualmente se busca diversificar la matriz dado que, el respaldo energético representa una alta dependencia a las termoeléctricas. [3], [4].

Asimismo, la energía geotérmica es un recurso renovable que ha cobrado relevancia en varios países. Se basa en el aprovechamiento del calor interno de la Tierra y actualmente se utiliza para la generación de electricidad en 26 países, así como en más de 90 naciones para aplicaciones domésticas, industriales y agrícolas, como la calefacción y el aire acondicionado. La capacidad instalada para

la producción eléctrica geotérmica es de aproximadamente 14,500 MW, mientras que para otros usos alcanza los 80,000 MW [5].

En Colombia se han desarrollado proyectos donde se usan otras fuentes renovables y actualmente se cuenta con 17 granjas solares, 2 parques eólicos y diferentes proyectos de autogeneración. La energía geotérmica en Colombia ha sido poco aprovechada hasta la fecha, según el servicio geológico colombiano se dispone de un potencial de 1.182 MW en recursos geotérmicos [4], [6].

Una de las aplicaciones del aprovechamiento de la geotermia es el acondicionamiento de recintos en busca del mejoramiento del confort térmico, según los requerimientos al interior del recinto y considerando las condiciones climatológicas del sitio. Este recurso renovable puede integrarse con el diseño bioclimático donde se aprovechan las características naturales del entorno y de la construcción misma del edificio, convirtiéndose en sistemas pasivos para regular la temperatura, la ventilación y la iluminación interior de manera eficiente y sostenible, creando ambientes saludables y cómodos que a su vez reducen el consumo energético de los edificios [7].

De acuerdo con lo anterior se generan estrategias como: el enfriamiento evaporativo, los muros de trombe, piscinas en techos, techos y paredes verdes, sistemas radiantes e intercambiadores de calor aire tierra (ICTA). Estos últimos tienen la capacidad de acoplarse a elementos mecánicos como los ventiladores, mejorando el rendimiento y eficiencia del sistema sin incurrir en el aumento del consumo energético que genera un sistema de enfriamiento convencional. Es evidente el potencial que presenta las energías renovables en Colombia, particularmente la energía geotérmica, permitiendo diseñar sistemas de enfriamiento para el mejoramiento en el confort térmico combinado con sistemas ICTA, es por ende, que en este trabajo se diseña un ICTA mediante conductos enterrados, con el fin de ser una fuente de climatización de una vivienda unifamiliar ubicada en la ciudad de Villavicencio en Colombia.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En 2011, Ecologistas en Acción realizaron un estudio en Europa que reveló que las ciudades que emplean sistemas de aire acondicionado experimentan un incremento en la temperatura atmosférica de 1,5 y 2 °C [8]. Este aumento está vinculado al manejo inadecuado o fugas de refrigerante comúnmente hidroclorofluorocarbonos (HCFC) durante el mantenimiento o la recuperación de estos mismos. Los HCFC contienen cloro, flúor y carbono, y se descomponen bajo la radiación ultravioleta, destruyendo la capa de ozono. Se estima que un solo átomo de cloro puede descomponer hasta 10.000 moléculas de ozono, lo que agrava el calentamiento global al aumentar la temperatura promedio del planeta [9].

Los sistemas de enfriamiento convencionales intensifican la emisión de gases de efecto invernadero generando altos consumos de energía, siendo la consecuencia de la mayor alza del costo en el consumo en los hogares; según un estudio realizado por Corpoema y La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) donde muestran que el consumo mensual de electricidad por un hogar promedio colombiano es de 157 kWh y que para el 2015, año donde realizaron el estudio, existían 13'314.305 viviendas, en consecuencia se consumía 2.085.522.453 kWh/mes, este consumo se distribuye como se muestra en la figura 1, de los cuales se destaca que el 48% de la energía final es consumida por sistemas de aire acondicionado y neveras, seguido del consumo por televisión e iluminación con un 15% [10].

Distribución consumo energía final -EE

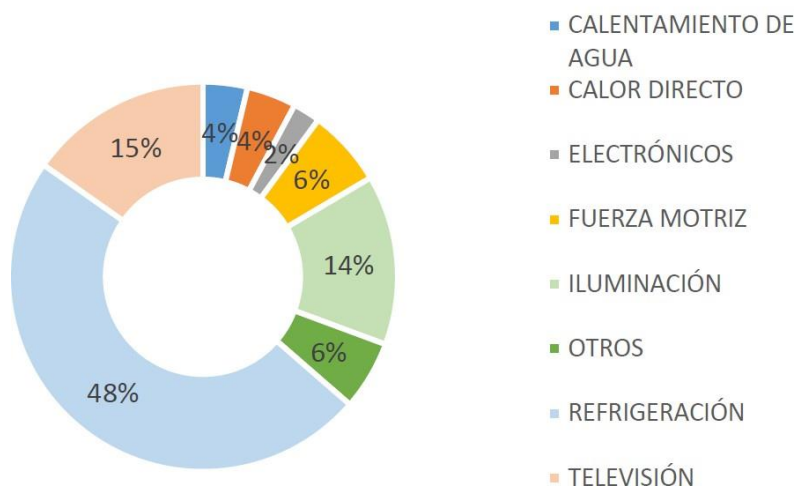


Figura 1. Distribución de consumo energético en los hogares colombianos en el 2015.

Fuente: [11].

Los llanos orientales son conocidos por sus extensas sabanas, este posee un clima con poca variabilidad que se divide en dos estaciones: invierno y verano, según la clasificación climática de Köppen la temperatura llega a elevarse; en promedio hasta los 32°C generando una sensación térmica calurosa durante todo el año [11]. Debido a estas condiciones climáticas y al aumento de la temperatura asociado al calentamiento global, cada vez más personas optan por adquirir sistemas de enfriamiento convencionales, como los aires acondicionados, para lograr confort térmico en sus hogares. Sin embargo, este incremento en el uso de equipos de climatización también implica un aumento en el consumo y el costo de energía eléctrica, reflejado en las facturas de los proveedores de servicios, a pesar de que estos sistemas son cada vez más eficientes y de menor impacto ambiental.

Según un comunicado de prensa del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en 2022 el 36,6% de la población del país se encontraba en condición de pobreza, el 30,7% en situación de vulnerabilidad, el 29,9% pertenecía a la clase media, y el 2,8% a la clase alta. Los ingresos per cápita mensuales para la población en pobreza y vulnerabilidad oscilan entre \$396.864 y \$781.120 COP, destinados a cubrir gastos esenciales como alimentación, vivienda y artículos de primera necesidad [12], [13]

Un aire acondicionado de 9,000 BTU, una de las capacidades más bajas disponibles en el mercado, suele cubrir un espacio de aproximadamente 15 m², ideal para una habitación pequeña. Su precio ronda los \$1.700.000 COP y presenta un consumo mensual estimado de 103,65 kWh. Con un costo promedio del kWh en la región de \$700 COP, esto representa un gasto adicional de \$72.555 COP al mes.

Por lo tanto, para la población en condiciones de pobreza y vulnerabilidad, según el informe del DANE, la adquisición de estos sistemas representa una decisión financiera compleja debido a la inversión inicial y al aumento en el costo de consumo eléctrico que implica su operación [14], [15], [16]. De acuerdo con lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Puede un sistema de enfriamiento mediante un sistema ICTA, implementarse en las viviendas de la ciudad de Villavicencio, Meta, con el fin de reducir las emisiones de efecto invernadero y, al mismo tiempo, ofrecer beneficios económicos?

3. JUSTIFICACIÓN

Suplir la demanda de consumo energético de forma sostenible ambientalmente es una problemática que se vive a nivel mundial, principalmente en los países donde las emisiones de gases de efecto invernadero son mayores, esto como consecuencia del uso de combustibles fósiles, las malas prácticas de estos recursos, la obsolescencia de tecnologías y la gestión de estos residuos. Los objetivos de desarrollo sostenible buscan la descarbonización, la protección ambiental y el mejoramiento de la eficiencia energética; estos fueron pactados por diferentes países entre ellos Colombia en la 21^a conferencia de las naciones Unidas sobre el cambio climático (COP21) de París y quedan establecidos los objetivos a largo plazo en el Acuerdo de París. En la figura 2 se muestra la contribución del proyecto a los objetivos de desarrollo sostenible.



Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible relacionados al proyecto.
Fuente:[17].

La ubicación cercana a la línea ecuatorial del país conlleva a adquirir y usar con frecuencia sistemas de acondicionamiento de aire debido al aumento de la temperatura provocado por el cambio climático.

Por lo tanto, la implementación de sistemas pasivos combinados con ventilación mecánica en un diseño de sistema ICTA se presenta como una alternativa efectiva para disminuir la temperatura del recinto, contribuyendo con la descarbonización y la protección del medio ambiente, siendo un impacto positivo en la región del Meta, donde se evaluará el diseño del ICTA, disminuyendo el consumo energético de la vivienda generando un ahorro económico significativo y un impacto ambiental bajo.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar numéricamente un sistema de enfriamiento del tipo intercambiador de calor aire tierra horizontal, con el propósito de determinar las dimensiones óptimas que satisfacen los requerimientos de enfriamiento de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Villavicencio.

4.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones climáticas y parámetros de la vivienda, para calcular los requerimientos de enfriamiento de la vivienda.
- Seleccionar dos configuraciones geométricas de intercambiadores de calor aire tierra horizontales, basados en la búsqueda bibliográfica para su posterior estudio numérico.
- Simular los intercambiadores de calor aire tierra, variando su área superficial, en diferentes épocas del año usando el software ANSYS Fluent.

5. ALCANCE

Este proyecto muestra los parámetros y alternativas que suple la demanda energética por efectos de enfriamiento que existe en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Villavicencio, esto como consecuencia de la ubicación geográfica de la ciudad, caracterizada por un clima cálido y húmedo, evidenciando la necesidad de implementar alternativas energéticas con el fin de suplir la demanda de esta de forma sostenible.

Es de esta manera que al integrar la energía geotérmica mediante un sistema de enfriamiento tipo ICTA, que consiste en conductos enterrados que aprovechan el calor del suelo, se estima que este tipo de sistema puede satisfacer la necesidad de climatización, reducir el consumo de energía eléctrico y, al no utilizar refrigerantes, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en la vivienda [18], [19].

El proyecto permite evaluar si este tipo de sistemas puede sustituir los sistemas de enfriamiento convencionales. Según las necesidades específicas de cada investigación o proyecto futuro, el diseño podría adaptarse para cumplir con los requerimientos particulares de cada caso.

Inicialmente, se realiza la recopilación de datos meteorológicos para establecer las condiciones climáticas del sitio y determinar los requerimientos de renovación de aire según las condiciones de enfriamiento, seguida de una revisión bibliográfica que tiene como propósito identificar dos configuraciones geométricas comunes para estos sistemas, finalmente se procede a realizar simulaciones de estas dos configuraciones bajo diferentes condiciones, mediante el software de dinámica de fluidos computacional ANSYS Fluent.

De acuerdo con las actividades, se determina cuál de las configuraciones y condiciones geométricas genera menores pérdidas de presión y reduce la temperatura de entrada al sistema de manera más eficiente, estableciendo así las dimensiones óptimas para su funcionamiento. Como referencia para suplir el requerimiento de refrigeración, se tienen en cuenta guías de selección y recomendaciones de los fabricantes para una elección aproximada pero efectiva de un sistema tradicional para realizar la comparación con el sistema ICTA.

El alcance de este proyecto solo incluye el diseño del sistema ICTA para los requerimientos de la vivienda en mención.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. Marco teórico.

6.1.1. Intercambiadores de calor aire tierra.

Los intercambiadores de calor se caracterizan por componerse de tubos enterrados a diferentes profundidades en la tierra, se seleccionan los materiales, diámetros y longitud dependiendo de la aplicación o requerimientos del sistema; por el ducto circula aire ya sea accionado por un ventilador o de manera natural, con el fin de intercambiar calor con la tierra donde se encuentran enterrados, aprovechando una temperatura del suelo prácticamente constante entre los 8 y 10 metros de profundidad, una vez el aire salga del ducto este se encontrará a una menor temperatura enfriando el recinto donde se ubica el sistema [20].

6.1.1.1. Principio de funcionamiento de los ICTA.

Los sistemas de intercambio de calor geotérmico que aprovechan la inercia térmica del suelo en pocas profundidades son los intercambiadores de calor aire tierra, lo que genera beneficios energéticos según el objetivo del sistema, ya sea aumentar o disminuir la temperatura del fluido que circula en la tubería dispuesta para el sistema, impulsando este mismo hacia el espacio a enfriar mejorando el confort térmico y la renovación de aire en el mismo [21].

Existen diferentes configuraciones de intercambiadores de calor aire tierra, simplificados o detallados y se diferencian principalmente por su geometría lo cual determina las pérdidas de presión haciendo que un sistema sea ineficiente energéticamente en comparación de los otros diseños [21].

6.1.1.2. Leyes de la termodinámica.

Para entender el funcionamiento del sistema en cuestión, es crucial tener una comprensión clara de su fundamentación, que se apoya en las leyes de la termodinámica. Estas leyes ofrecen un concepto esencial sobre cómo se lleva a cabo el intercambio de calor entre el fluido y el arreglo de tubos enterrados en el suelo.

- Primera ley de la termodinámica: Principio de conservación de la energía, esta ley brinda bases sólidas para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía como el calor Q , el trabajo W y la energía total de un cuerpo. Además, se establece que la energía no se crea ni se destruye, solo puede cambiar de forma o transferirse de un objeto a otro, en un mundo ideal esta transferencia no cuenta con pérdidas de energía lo cual hace que se trate de una conservación eficiente [22].

- Segunda ley de la termodinámica: Afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad y que los procesos de intercambio de energía ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía, brinda las bases para conservar la calidad de la energía además de determinar la degradación que tiene durante algún proceso [22].

6.1.1.3. Fundamentos termodinámicos.

El principio de funcionamiento se basa en la tasa de transferencia de calor que se puede obtener en el sistema, entre el aire que circula en el ducto y el terreno que rodea el ducto donde toda la energía se disipa en el suelo, hasta encontrar el equilibrio térmico con la tubería [20], en los sistemas ICTA se desarrolla transferencia de calor por convección y se relaciona mediante la ecuación 1 como un análisis térmico general.

Ec. 1. Transferencia de calor por convección.

$$Q = \dot{m}_{air} * C_{p_{air}} * (T_{out,air} - T_{in,air}) [W]$$

Donde:

$Q [w]$ = Es la razón de transferencia de calor hacia el fluido o desde este.

$\dot{m}_{air} [kg/s]$ = Es el flujo másico de aire que atraviesa el ducto.

$C_{p_{air}} [J/kgK]$ = Es la capacidad de calor del aire para el cambio de temperatura.

$T_{in} [k]$ = Es la temperatura del aire a la entrada del ducto.

$T_{out}[k]$ = Es la temperatura de salida del aire.

La temperatura del suelo será constante ya que se considera como un sólido semi-infinito, en la transferencia de calor desde o hacia un fluido que fluye en un tubo, se considera la temperatura superficial constante (T_s) y basándose en la ley de enfriamiento de newton, la razón de transferencia de calor por convección se expresa en la ecuación 2.

Ec. 2. Ley de newton de enfriamiento.

$$Q = hA_s\Delta T_{prom} = hA_s(T_s - T_m)_{prom} [W]$$

Donde:

h = Es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio.

$A_s[m^2]$ = Es el área superficial para la transferencia de calor.

$\Delta T_{prom} [k]$ = Diferencia promedio de temperatura entre el fluido y la superficie, se muestra en la ecuación 3.

Ec. 3. Diferencia media de temperatura.

$$\Delta T_{prom} = T_s - \frac{T_i + T_e}{2}$$

Donde:

$T_i [K]$ = Es la temperatura de entrada del fluido.

$T_e [K]$ = Es la temperatura media del fluido en la salida del tubo y se determina con la ecuación 4.

Ec. 4. Temperatura media del fluido a la salida del tubo.

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp\left(\frac{-hA_s}{\dot{m} C_p}\right)$$

Para este tipo de transferencia de calor cuando la temperatura superficial es constante, la diferencia de la temperatura media del fluido y el tubo decae en dirección del flujo es decir que la temperatura del fluido tiende a ser la misma temperatura de la superficie $T_e = T_s$ [23].

Además, es necesario clasificar el flujo del fluido de trabajo, que puede dividirse en flujo compresible o incompresible, flujo estacionario o no estacionario, flujo unidimensional, bidimensional o tridimensional, así como en flujo laminar o turbulento. Este estudio clasificará el flujo de fluido en función del movimiento del fluido. El flujo laminar se caracteriza por ser ordenado y suave, mientras que el flujo turbulento se distingue por ser altamente desordenado y caótico, donde se presentan velocidades elevadas [23].

El flujo del sistema se define según el número de Reynolds, donde se clasifica como flujo laminar si este tiene un valor menor o igual de 2300, flujo de transición si está entre 2300 y 4000 y flujo turbulento completamente desarrollado con un valor mayor o igual a 4000, este se especifica mediante la ecuación 5.

Ec. 5. Número de Reynolds

$$Re = \frac{v_{prom} * d_{int}}{\gamma} = \frac{\rho * v_{prom} * d_{int}}{\mu}$$

Donde:

$v_{prom} [m/s]$ = Es la velocidad promedio del fluido.

$d_{int} [m]$ = Es el diámetro interno de la tubería.

$\gamma [m^2/s]$ = Es la viscosidad cinemática del fluido.

$\rho [kg/m^3]$ = Es la densidad del fluido.

$\mu [kg/ms]$ = Es la viscosidad dinámica del fluido.

Es crucial calcular la caída de presión en el flujo de tuberías para asegurar la integridad del sistema y garantizar el caudal requerido. Este cálculo es determinante para definir los requisitos de potencia, en este caso para el dimensionamiento del ventilador.

Se define que la caída de presión en una tubería horizontal con área transversal y velocidad constante es igual a la pérdida de presión y se usa la ecuación 6, la cual aplica para todos los tipos de flujos internos completamente desarrollados.

Ec. 6. Caída de presión en una tubería horizontal.

$$\Delta P = f L \frac{\rho V_{prom}^2}{D}$$

Donde:

$\frac{\rho V_{prom}^2}{2}$ [Pa] = Es la presión dinámica.

L [m] = Longitud lineal de la tubería.

D [m] = Diámetro interno de la tubería.

f = Es el factor de fricción de Darcy y se muestra en la ecuación 7 para un flujo Laminar, en el caso de los flujos turbulentos se usa la ecuación de Colebrook como se muestra en la ecuación 8 o la ecuación de Haaland en la ecuación 9, ambas ecuaciones tienen en cuenta la rugosidad de la tubería.

Ec. 7. Factor de fricción de Darcy para flujo laminar.

$$f = \frac{64}{Re}$$

Ec. 8. Factor de fricción de Colebrook para flujo turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$$

Ec. 9. Factor de fricción de Haaland para flujo turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log\left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right)^{1.11}\right)$$

Donde:

ε [mm] = Rugosidad absoluta.

Adicionalmente se incluye la pérdida de carga por fricción y se describe en la ecuación 10.

Ec. 10. Pérdida de carga por fricción.

$$hl = \frac{\Delta P_L}{\rho g}$$

Donde:

$g \left[\frac{m}{s^2} \right]$ = Es la gravedad.

Una vez definidas las perdidas, se calcula la potencia requerida para impulsar el fluido como se muestra en la ecuación 11.

Ec 11. Potencia necesaria.

$$W = \Delta P_L * V$$

Donde:

$V [m^3/s]$ = Es el flujo volumétrico y es el producto entre la v_{prom} y el A_c Área transversal.

6.1.2. Temperatura del suelo.

La temperatura del suelo es uno de los principales factores para tener en cuenta en la obtención de un intercambio de calor eficiente, donde la energía aportada por la radiación solar, precipitaciones y otros atmosféricos es transferido diariamente y desde la superficie de la tierra produciéndose un equilibrio térmico, donde aproximadamente a los 10 metros la temperatura del suelo es constante y es considerada como la temperatura media anual. En consecuencia, de lo anterior, para obtener temperaturas verosímiles se debe realizar un estudio para determinar la temperatura del suelo a diferentes profundidades por un tiempo mínimo de un año [24].

La temperatura al interior de la tierra es mayor si la profundidad también lo es, al existir un gradiente de temperaturas se produce un flujo de calor o flujo geotérmico, este se define por la ley de Fourier de conducción de calor como se muestra en la ecuación 12.

Ec. 12. Ley de Fourier de conducción de calor.

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

Donde:

$K \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$ = Es la conductividad térmica del material.

$\frac{\Delta T}{\Delta X} \left[\frac{^{\circ}C}{m} \right]$ = Es el gradiente de temperaturas o geotérmico normal $\frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{1}{33}$

Es por esto que se estima un modelo de temperatura del suelo con el fin de determinar un gradiente geotérmico constante, se tienen en cuenta las características térmicas que se encuentran en la zona y la composición del suelo, el modelo matemático se define usando el principio de conducción de calor aplicado a un sólido semi-infinito el cual predice la temperatura del suelo $T(t, z)$ en varias épocas del año y a diferentes profundidades; como se relaciona en la ecuación 13 [24], [25].

Ec. 13. Modelo de temperatura del suelo.

$$T(t, z) = T_{mean} + T_{amp} * e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{360*\alpha_{cos}}}} \left[\frac{2\pi}{365} [(t - t_0) - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha * \pi}}] \right]$$

Donde:

$a [m^2/s]$ = es la difusividad térmica la cual se relaciona en la ecuación 14.

$T_{mean} [^{\circ}C]$ = Es la temperatura anual promedio.

$T_{amp} [^{\circ}C]$ = Es la variación de temperatura.

$Z [m]$ = Es la profundidad desde la superficie del suelo.

t = Es el día analizado y t_0 es el día con mayor temperatura.

Ec. 14. Difusividad térmica.

$$a = \frac{\lambda}{\rho * Cp}$$

Donde λ es la conductividad térmica del suelo, ρ es la densidad del suelo y Cp es el calor específico a presión constante, el producto de estos dos se define como la capacidad térmica volumétrica.

La conductividad térmica es una medida de la capacidad del material para conducir calor y se conduce en dirección de temperatura decreciente. La capacidad térmica volumétrica o inercia térmica es la capacidad que tiene un elemento para almacenar o disipar su energía térmica, esta propiedad indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que esta es transferida a otro cuerpo o espacio, en relación con el terreno es el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno con el incremento de la temperatura [22], [26]

Las conductividades y capacidades térmicas de diferentes tipos de suelos se definen en la figura 3.

Tipo de roca	Conductividad térmica [W/mK]			Capacidad máxima volumétrica [MJ/m³K]
	Mínimo	Valor típico	Máximo	
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Periodita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		Aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava saturada de agua		Aprox. 1,8		Aprox. 2,4
Arena seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	Aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	Aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0-20°C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+10°C)		0,58		4,19

Figura 3. Conductividades y capacidades térmicas de diferentes tipos de suelos.
Fuente:[20].

La temperatura ambiente que entra al sistema se define usando la base de datos del IDEAM donde se tendrá en cuenta los valores que refieran las condiciones críticas del ambiente, seleccionando el día donde el promedio de temperatura sea mayor.

6.1.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD).

Se realizará un modelado numérico basado en dinámica de fluidos computacional, el cual soluciona ecuaciones de gobierno para flujo en ductos y transferencia de calor. Las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes y son una aproximación al comportamiento dinámico real de los fluidos. Estas ecuaciones diferenciales parciales fueron derivadas, por esto pueden ser discretizadas y solucionadas numéricamente. El método de

solución para estas ecuaciones y el más común que se usara es el de volúmenes finitos el cual es un método conservativo que tiene la ventaja de permitir mallas de cómputo no estructuradas. [27]

Las ecuaciones derivadas parciales son integradas en el tiempo y espacio produciendo un sistema de ecuaciones algebraicas, donde la geometría se divide en pequeñas regiones llamadas volúmenes de control y estas ecuaciones son solucionadas de forma iterativa para cada uno.

Entre las ecuaciones de conservación se localiza la ecuación de continuidad para la conservación de la masa y tres ecuaciones de conservación del momento dependientes del tiempo, estas dos son usadas para todos los sistemas, adicionalmente se incluye una ecuación de conservación de la energía y es usada cuando existen cambios de temperatura, reacciones o transferencia de calor y masa. Se da solución a estas ecuaciones relacionando valores promedio de velocidad y temperatura en el área transversal del flujo, buscando la convergencia de estos [28], [29]

Para la conservación de masa, donde se establece que no se crea ni se destruye, y que debe ser consistente la cantidad de masa que entra y sale de un sistema cumpliéndose en todo momento, haciendo referencia a la primera ley de la termodinámica. En la ecuación 15 se muestra la conservación de masa que deben tener todos los sistemas.

Ec. 15. Conservación de masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Donde:

$\rho [kg/m^3]$ = Es la densidad.

$u, v \text{ y } w [-]$ = Son las componentes de la velocidad.

$t [s]$ = Es el tiempo.

$x, y \text{ \& } z [m]$ = Son las componentes de la posición.

La conservación de la energía es fundamental para un sistema que pasa por cualquier proceso, indicando que el cambio de la cantidad de esta en un sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la entrada y salida de energía, la ecuación se usa cuando el sistema está sometido a transferencia de calor como se muestra en la ecuación 16.

Ec. 16. Conservación de energía.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \\ + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \end{aligned}$$

Donde:

$E_T [J]$ = Es la energía total del sistema.

$q [W/m^2]$ = Es el flujo de calor.

Pr_r = Es el número de Prandtl.

Re_r = Es el numero de Reynolds.

$\tau [N/m^2]$ = Componentes del tensor de tensiones.

Finalmente, la conservación de la cantidad de movimiento expresa la segunda ley de Newton donde la tasa de cambio de la cantidad de movimiento en un sistema es igual a las fuerzas que actúan en el mismo, en este caso en cada una de las 3 direcciones x, y & z, donde esta incluye fuerzas superficiales y volumétricas, aplicable en todos los sistemas. En las ecuaciones 17, 18 y 19 se muestran la conservación de la cantidad de movimiento para cada una de las direcciones mencionadas.

Ec. 17. Conservación de la cantidad de movimiento en X.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

Ec. 18. Conservación de la cantidad de movimiento en Y.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

Ec. 19. Conservación de la cantidad de movimiento en Z.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

6.1.4. Desempeño energético.

La eficiencia como optimización en el consumo energético, se define en función del coeficiente de desempeño COP. El coeficiente de desempeño es la razón entre calor/frío producido y la entrada de energía eléctrica, se expresa en la ecuación 20.

Ec. 20. Coeficiente de desempeño COP.

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto,in}}$$

Donde Q_L es la cantidad de calor absorbido del espacio refrigerado a una temperatura baja (T_L) y $W_{neto,in}$ es la entrada de trabajo neto que requieren los dispositivos del sistema y se muestra en la ecuación 21.

Ec. 21. Entrada de trabajo neto.

$$W_{neto,in} = Q_H - Q_L$$

Este coeficiente de desempeño también se puede expresar como en la ecuación 22 a continuación.

Ec. 22. Coeficiente de desempeño COP refrigeración.

$$COP_R = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

Donde T_H Es la temperatura más alta.

Por otra parte, la eficiencia energética del ICTA, en términos de que la temperatura del suelo se estime constante, se define bajo la ecuación 23.

Ec. 23. Eficiencia energética del ICTA.

$$\varepsilon = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{soil}} * 100\%$$

6.2. Marco conceptual.

6.2.1. Energía geotérmica.

La energía geotérmica es una fuente de energía renovable que ha sido poco explorada, pero ofrece gran potencial de manera constante y sostenible al aprovechar directamente el calor natural que existe al interior de la tierra, permitiendo que sea una alternativa en generación de energía [30]. Al ser un tipo de

energía con fuente renovable cobra un valor importante ya que generan un menor impacto ambiental, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con las fuentes energéticas convencionales.

Este tipo de energía renovable se diferencia de los demás tipos de energía en cuanto a las condiciones climáticas, ya que esta no depende de las variaciones que pueda tener, generando ventajas en su aprovechamiento, la energía eólica, solar e hidráulica si genera una dependencia a las condiciones climáticas para lograr su aprovechamiento, por ende se busca su implementación en lugares donde se obtenga el potencial de estos recursos para la posterior generación de energía [31].

El calor al interior de la tierra llega a la superficie en la corteza terrestre; la diferencia de temperatura entre estas dos se le llama gradiente geotérmico y varía la temperatura de la tierra según la profundidad, normalmente la temperatura aumenta de forma regular 1°C cada 33 metros de profundidad, en toda la tierra se manifiesta este proceso al cual se le llama flujo de calor, es por esta razón que se considera que el desarrollo de la geotermia es favorable en cualquier zona. Asimismo, existen zonas con mayor potencial geotérmico con gran posibilidad de acumulación de calor tales como los volcanes y manifestaciones termales [31].

6.2.1.1. Tipos de geotermia.

El recurso geotérmico se clasifica de acuerdo con la cantidad de energía térmica acumulada en su interior, por esta razón, los tipos de energía geotérmica se definen por la temperatura del recurso geotérmico disponible a diferentes profundidades haciendo uso de sondas que miden la temperatura en profundidades específicas, en la tabla 1 se muestran los tipos de geotermia y su aplicación.

Tabla 1. Tipos de energía geotérmica.

Tipos de energía geotérmica			
Categoría	Rango de T °C	Aplicación	
Alta temperatura	>150°C	Transforma directamente el vapor de agua en energía eléctrica.	
Media temperatura	80°C a 150°C	Permite producir energía eléctrica usando un fluido de intercambio.	
Baja temperatura	30°C a 80°C	Insuficiente para producir energía eléctrica, adecuado para procesos industriales y de climatización.	
Muy baja temperatura	<30°C	Calefacción y climatización usando bombas de calor.	

Fuente: Autor, [32], [33]

6.2.1.2. Propiedades geotérmicas del suelo.

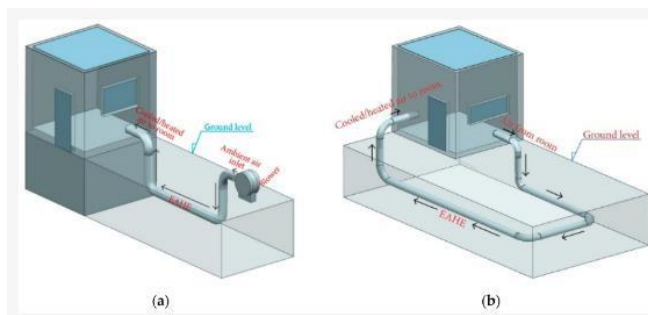
Las propiedades del suelo donde se pretende implementar el ICTA son fundamentales ya que de estas dependen el intercambio de calor que se generará en la tubería. Al realizar un intercambio térmico con el suelo, la energía térmica o la temperatura del suelo depende de la profundidad donde se evalúa el sistema, es importante conocer su composición y las características térmicas y físicas del mismo, lo cual genera diferentes perfiles de temperatura que se deben tener en cuenta al momento de realizar el estudio [20]

Las propiedades térmicas del suelo que definen la transferencia de calor son base fundamental para el funcionamiento de los ICTA, relacionando la conductividad y las capacidades térmicas volumétricas que existe en el suelo, estas propiedades se evidencian en la figura 3.

6.2.2. Configuraciones de ICTA.

Las configuraciones de intercambiadores de calor aire tierra se determinan según la trayectoria del flujo de aire, ya sea un circuito abierto o cerrado y bajo la estructura del sistema; entre estas configuraciones se clasifican en directos aislados (anillo), serpentín y distribución techelmann (rejilla), estos se seleccionan dependiendo el

espacio disponible de instalación [19]. En la figura 4 se muestra la trayectoria del flujo de aire.



a) Circuito abierto; b) Circuito cerrado

Figura 4. Trayectoria abierta y cerrada en los sistemas de ICTA

Fuente: [25]

En los intercambiadores de calor aire tierra, el fluido de trabajo solo tiene contacto con el ducto que lo contiene, para obtener mejoras en la eficiencia energética del calor que es disipado o extraído del suelo depende de manera importante la profundidad de los intercambiadores y la distancia que existe entre los tubos, es por esto que seleccionar la configuración del sistema de intercambiador de calor adecuado tiene ventajas a nivel energético, disminuyendo el consumo de energía y mejorando la transferencia de calor en el mismo [32]. A continuación, se muestran algunas de las configuraciones horizontales de los intercambiadores de calor aire tierra en las figuras 5, 6 y 7.

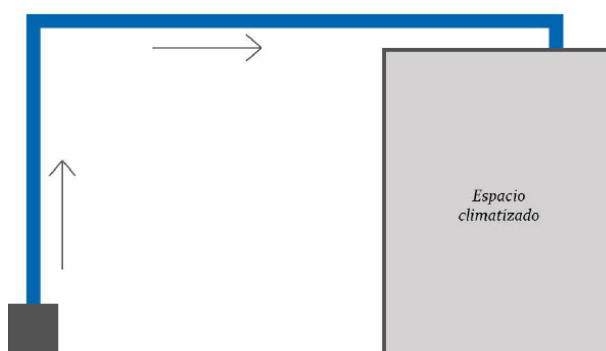


Figura 5. Configuración directa (anillo).

Fuente: [26]

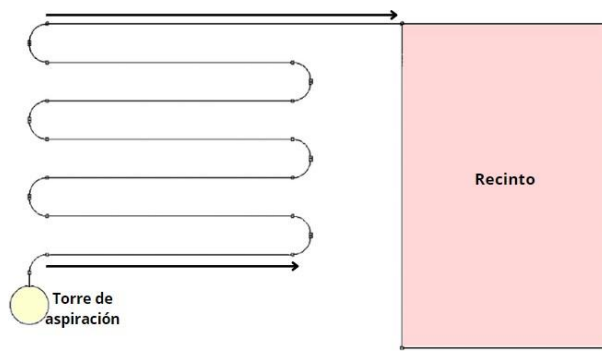


Figura 6. Configuración serpentin.
Fuente: Autor.

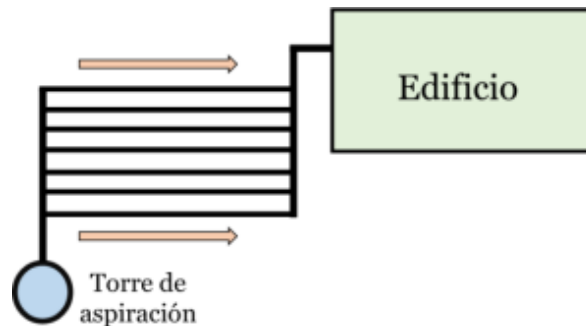


Figura 7. Configuración tichelmann.
Fuente: [20].

6.2.3. Criterios de diseño.

Para llevar a cabo el estudio del intercambiador de calor, se debe tener en cuenta las características geométricas, características térmicas del terreno, las características térmicas del tubo y la temperatura a la profundidad donde serán instalados los tubos, esta última se define a partir del modelo de temperatura del suelo mostrado en la ecuación 13 o de forma experimental.

Por otra parte, un correcto diseño contempla los siguientes criterios [19].

- Determinar el caudal de aire necesario.
- Analizar la temperatura media del lugar.
- Definir el material de los tubos.
- Evaluar el diseño bajo las condiciones geométricas establecidas, con el fin de estimar el comportamiento del modelo.

6.2.4. Material del ducto.

Para este tipo de sistemas es común el uso de PVC, Polipropileno, Hormigón, Tubos metálicos entre otros, el acabado de estos, pueden generar mayores pérdidas de presión generando turbulencias en el fluido. En la tabla 2 se muestran los materiales con mayor uso y sus ventajas.

Tabla 2. Materiales de mayor uso en ICTA.

Material del ducto.	Características.	Conductividad térmica (W/mK).
Caucho	• Es un tubo liso • Bajo costo • Fácil instalación • Instalación continua	• 0,1 – 0,14
Acero inoxidable	• Instalación continua o con desagüe • Costo moderado • Geometría variable (Diámetro y dimensiones) en el mercado	• 14,2 – 15,1
PVC	• Geometría variable (Diámetro y dimensiones) en el mercado • Bajo costo • Regulación para desagüe • Instalación fácil	• 0,17
Concreto	• Ducto prefabricado • Alto costo • Instalación compleja y costosa • Estabilidad de la masa térmica	• 0,8-1,9

Fuente:[21].

6.2.5. Dimensiones del sistema.

La dimensión del conducto, velocidad y temperatura ambiente, influyen en las condiciones del sistema y en el objetivo que es disminuir la temperatura a la salida del aire. Se destaca que las características de temperatura del suelo son importantes y tiene influencia con el comportamiento térmico del sistema, a mayor longitud del ducto va a existir mayor transferencia de calor logrando la reducción de la temperatura del fluido, usualmente la longitud varía desde los 10 a los 100 metros; la velocidad del fluido y el diámetro también son variables que benefician la transferencia de calor; varios expertos aseguran que la velocidad debe situarse entre 1 y 4 m/s [34], [35].

6.2.6. Mantenimiento del sistema ICTA.

La durabilidad de los componentes del sistema de enfriamiento está directamente influenciada por los materiales empleados en su construcción. Dado que el sistema manipula fluidos circundantes, es susceptible a la formación de condensación dentro de las tuberías debido a las variaciones de temperatura y la velocidad del aire. Este fenómeno puede acarrear consecuencias a largo plazo, como la generación de malos olores y la proliferación de bacterias. Para mitigar estos problemas, es necesario llevar a cabo limpiezas periódicas de los conductos, lo que a su vez requiere que el sistema esté diseñado con una pendiente adecuada para facilitar la evacuación [20].

El mantenimiento preventivo de los equipos exteriores es fundamental para garantizar su óptimo funcionamiento y prolongar su vida útil. Estas labores de mantenimiento deben realizarse conforme a las recomendaciones del fabricante lo cual asegura un rendimiento adecuado. Esto aplica especialmente a componentes como ventiladores, bombas y filtros. Además, en el caso de las tuberías enterradas, se estima una vida útil para diferentes materiales. Por ejemplo, el PVC, según estimaciones de empresas como Pavco, tiene una vida útil aproximada de 50 años [36].

6.3. Estado del arte.

En Colombia existe un proyecto piloto de generación de energía eléctrica aprovechando los pozos petroleros existentes, estos captan agua caliente y vapor que se encuentran de forma natural a cierta profundidad del suelo y es dirigida hacia la superficie para luego ser separados, el vapor pasa por una turbina y un generador encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica, después es transferido a la red eléctrica local; este proyecto consiste en la coproducción de hidrocarburos y energía eléctrica limpia a partir de pozos petroleros ubicado en el municipio de San Luis de Palenque, Casanare [6].

Por otra parte, Ecopetrol avanza estudios para ejecutar la instalación de una planta piloto de geotermia en el campo Apiay, ubicado en el departamento del Meta, que generará alrededor de 200 kilovatios (kW) para autoconsumo, aprovechando el calor que generan los fluidos de producción en los pozos petroleros existentes en la zona [37].

En cuanto al método de enfriamiento se encontró que su uso abarca desde la antigüedad donde las cuevas fueron los primeros intercambiadores de calor, ya que tenían la posibilidad de funcionar como un intercambiador natural aire tierra gracias a sus propiedades geológicas y térmicas, haciendo posible alcanzar una temperatura constante durante todo el año; la temperatura constante dentro de la cueva es causada por la transferencia de calor entre los vientos dentro de ella y el

suelo que la rodea. Una de las principales aplicaciones que tuvo este sistema fue el almacenamiento de alimentos y productos susceptibles a la temperatura en la edad media, además de que fue un lugar idóneo para vivir, por lo cual fue usada por largo periodo de tiempo por los humanos en la antigüedad [38].

La implantación de un sistema de intercambio de calor tierra-aire en las villas de Costozza en el siglo XVI supuso un hito fundamental en la ingeniería de la obra y la climatización de los edificios. Este innovador sistema utilizó la temperatura constante del suelo para pre enfriar el viento antes de introducirlo en las villas, lo que permitió regular la temperatura y mejorar la calidad del viento en el medio de las villas. Además, la decisión de construir las villas sobre una cueva natural en la montaña permitió un mejor control sobre el flujo de viento y una mayor eficiencia del sistema de intercambio de calor. Canalizar el viento a través de la galería en la montaña permitió que el viento se pre enfriara de forma natural sin tener que usar energía adicional para calentar o enfriar el viento, reduciendo significativamente los precios de la energía y haciendo que el sistema sea más sostenible [39].

Un estudio realizado por estudiantes de la universidad tecnológica de Panamá evaluaron el potencial de un sistema geotérmico combinado con paneles fotovoltaicos para un hospital de la región, se establece inicialmente un diseño de serpentín de un tramo, como primera iteración por la simplicidad del sistema para después definir la geometría que mejor se adecue a las necesidades, en este caso usaron 14 tramos de tubería de 35 metros de longitud, estos se instalan a una profundidad de 5 metros como se muestra en la figura 8, para obtener una temperatura confort entre 26,1 y 27 °C [40].

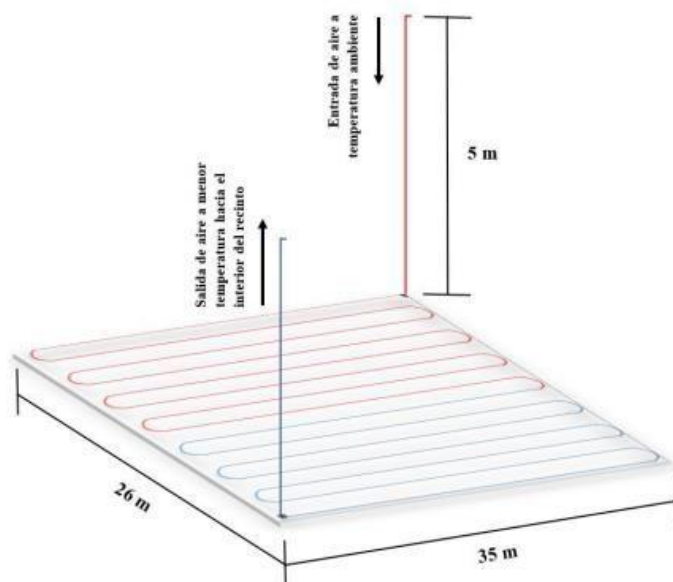


Figura 8. Disposición del sistema ICTA para un hospital de Panamá.
Fuente: [40].

Díaz et al, diseñaron un intercambiador de calor tierra aire en clima cálido-húmedo, donde se analiza la viabilidad para la construcción del prototipo propuesto mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional con el fin de validar la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de aire notando la influencia de la velocidad del aire sobre la temperatura. El diseño seleccionado es tipo serpentín de un solo tramo de 6 metros, el cual se analiza en una profundidad de 2.5 metros y con una tubería de 4" de diámetro, como se muestra en la figura 9. Se obtuvo una diferencia de temperatura de 2, 3 y 5 °C con velocidades de aire de 1, 3 y 5 m/s aquí concluyen que la velocidad de 1 m/s mostro un mejor rendimiento [41].

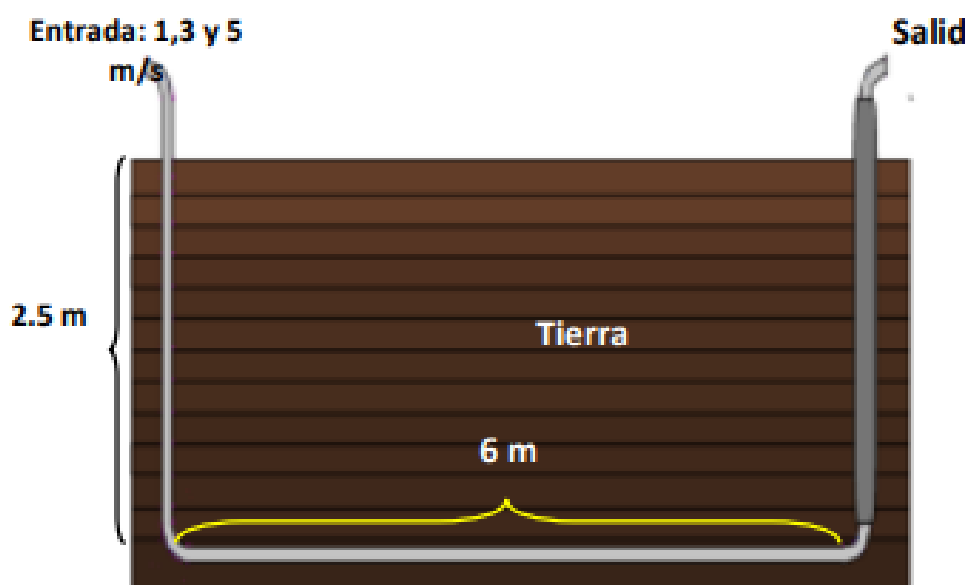


Figura 9. Disposición de un diseño ICTA para un clima cálido-húmedo.
Fuente: [41].

Pakari y Ghani realizaron una evaluación numérica del rendimiento térmico de un ICTA estacionario en 3D con cubierta de hierba corta, validaron el modelo con mediciones experimentales y analizaron bajo diferentes parámetros, como la temperatura del aire de entrada, la tasa de flujo de aire, la longitud y material del tubo determinando la influencia de estos en el rendimiento del intercambiador, el diseño analizado fue bajo la configuración en serpentín simple o de un solo tramo de tubería, de 21,5 m de longitud. El diseño es mostrado en la figura 10 [42].

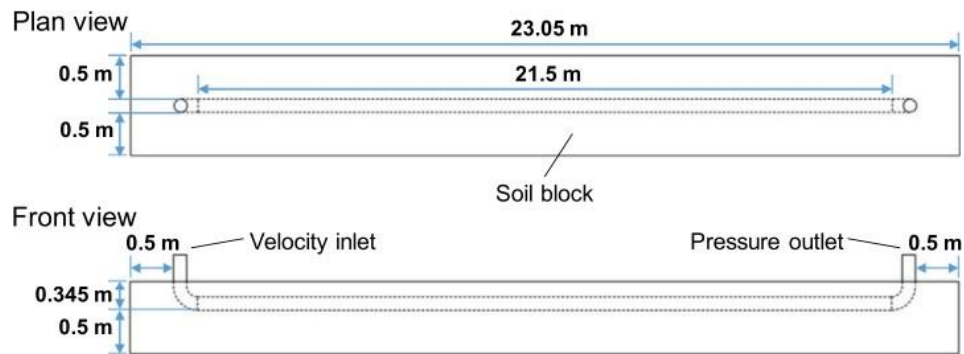


Figura 10. Disposición de un diseño ICTA para su posterior estudio numérico.
Fuente:[42].

Łukasz Amanowicz realizó un análisis experimental y numérico comparativo entre dos sistemas ICTA bajo la configuración Techelman donde la entrada y salida del flujo es tipo Z y U como se muestra en la figura 11. Con el fin de determinar si la modificación de la estructura puede influir en la eficiencia del intercambiador de calor y en la uniformidad de la división del flujo de aire, lo que puede conducir a la selección de un diseño más eficiente y que satisfaga las necesidades de confort térmico en interiores [43].

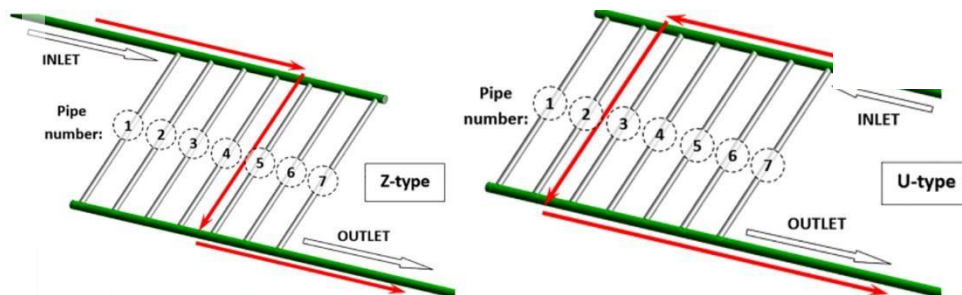


Figura 11. Disposición Techelman en Z y U para evaluar su rendimiento mediante análisis experimental y numérico.
Fuente: [43].

Otro de los estudios encontrados en la investigación hace parte de la universidad de Salento en Italia donde realizaron un diseño optimizado para un sistema de ventilación de un edificio residencial en clima cálido, realizando un estudio de fluidos computacional para una disposición tipo techelman en U como se muestra en la figura 12. Se realizaron diferentes iteraciones variando los parámetros geométricos y determinar cómo estos afectan la temperatura del edificio, de esta manera se demuestra la importancia de los sistemas geotérmicos optimizados con el fin de aumentar el ahorro energético [44].

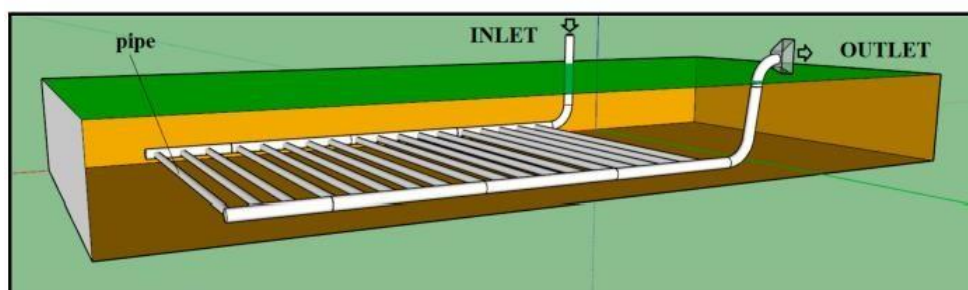


Figura 12. Disposición Techelman en U para evaluar su rendimiento en un edificio residencial.

Fuente: [44].

Un estudio realizado en 2010 por Bansal muestra el desarrollo de un modelo transitorio e implícito basado en la dinámica de fluidos computacional para predecir el rendimiento térmico y la capacidad de enfriamiento de los sistemas intercambiadores de calor aire tierra con conductos enterrados aprovechando la energía geotérmica con la finalidad de reducir la carga de refrigeración de los edificios en verano con la ayuda del programa ANSYS FLUENT [45].

En Colombia, Valenzuela realizó un estudio en el año 2022 en el departamento del Huila, donde presentó un diseño óptimo de ICTA, que puede ser implementado en viviendas para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en regiones cálidas. Para ello, se llevó a cabo un análisis de diferentes parámetros de diseño, como el caudal de aire, la geometría del intercambiador y la profundidad de enterramiento, entre otros; estos para una configuración como se muestra en la figura 13 [46].

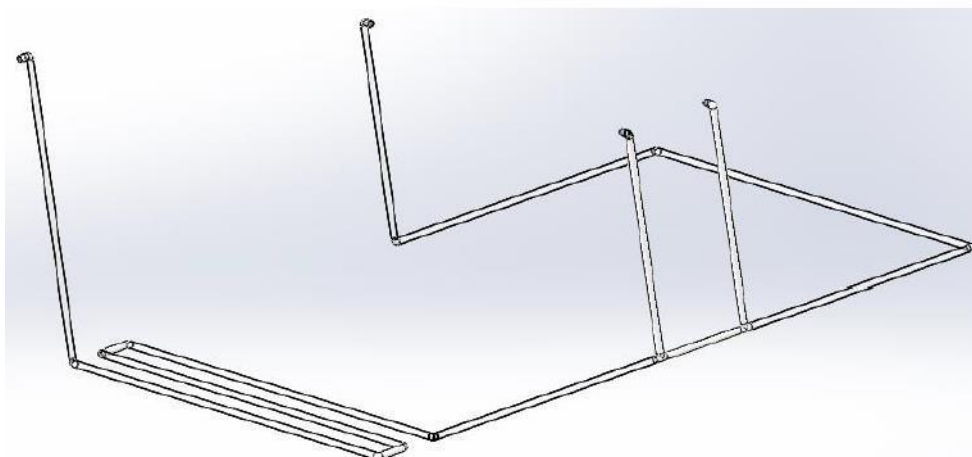


Figura 13. Disposición final en serpentina.

Fuente: [46]

Jaraba en 2022, realizó un estudio en el departamento de Sucre con la finalidad de analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de

climatización basado en un pozo canadiense, que permita a la empresa “Transportes santo domingo” reducir sus costos de energía y mejorar el confort térmico de sus instalaciones. El estudio incluye el diseño detallado del sistema, la simulación numérica del comportamiento térmico del suelo y del sistema de climatización [47].

6.4. Marco normativo

A nivel mundial, existen varias normas y estándares que regulan el diseño de intercambiadores de calor aire tierra, en Colombia no existe una norma vigente para la aplicación de tecnologías de geotermia [47], aun así, en este proyecto se usan las normas europeas, americanas e internacionales para determinar las renovaciones de aire necesarias para el recinto, son las siguientes:

ASHRAE 62.2: Es un estándar desarrollado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) que establece los requisitos mínimos de ventilación para viviendas y edificios de pequeña escala. Incluye pautas para la selección y diseño de sistemas de acondicionamiento tradicionales [48] .

La DIN 1946: Es la norma que se aplica a la planificación, construcción, pruebas de aceptación y operación (incluido el mantenimiento) de los sistemas de ventilación y aire acondicionado en edificios y salas de atención médica.

7. METODOLOGÍA

7.1. Descripción de etapas y tareas.

Para cumplir con los objetivos del proyecto, se determinan un conjunto de tareas y etapas que bajo fundamentos termodinámicos y la dinámica de fluidos computacional (CFD), facilitaran el cumplimiento del objetivo de la investigación, en la figura a continuación se encuentra un diagrama donde se describen las tareas para cada objetivo planteado.

- Objetivo 1: Determinar las condiciones climáticas y parámetros de la vivienda, para calcular los requerimientos de enfriamiento de la vivienda.

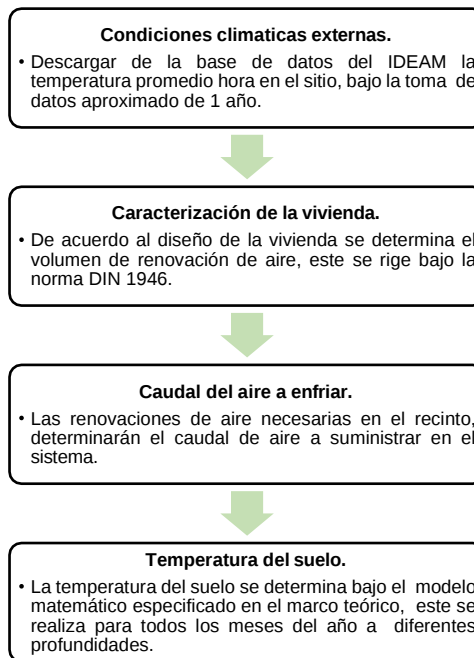


Figura 14. Metodología para desarrollar el objetivo 1.

Fuente: Autor.

- Objetivo 2: Seleccionar dos configuraciones geométricas de intercambiadores de calor aire tierra horizontales, basados en la búsqueda bibliográfica para su posterior estudio numérico.

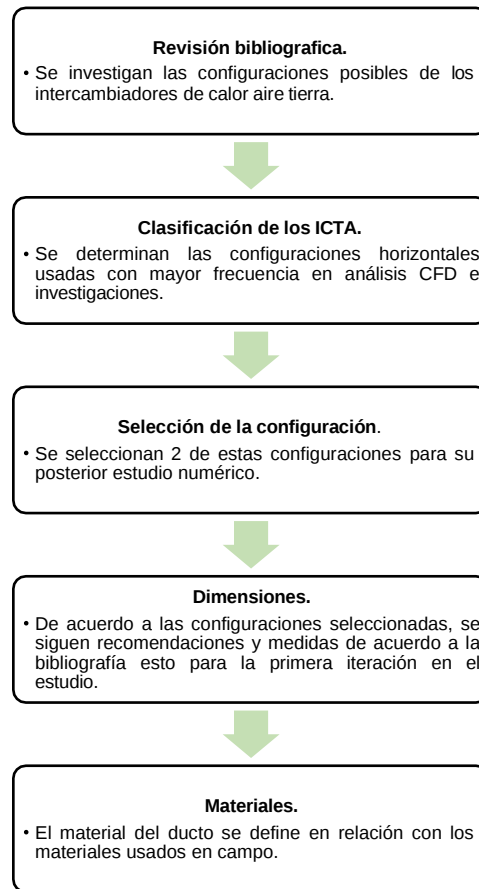


Figura 15. Metodología para desarrollar el objetivo 2.
Fuente: Autor.

- Objetivo 3: Simular los intercambiadores de calor aire tierra, variando su área superficial, en diferentes épocas del año usando el software ANSYS Fluent.

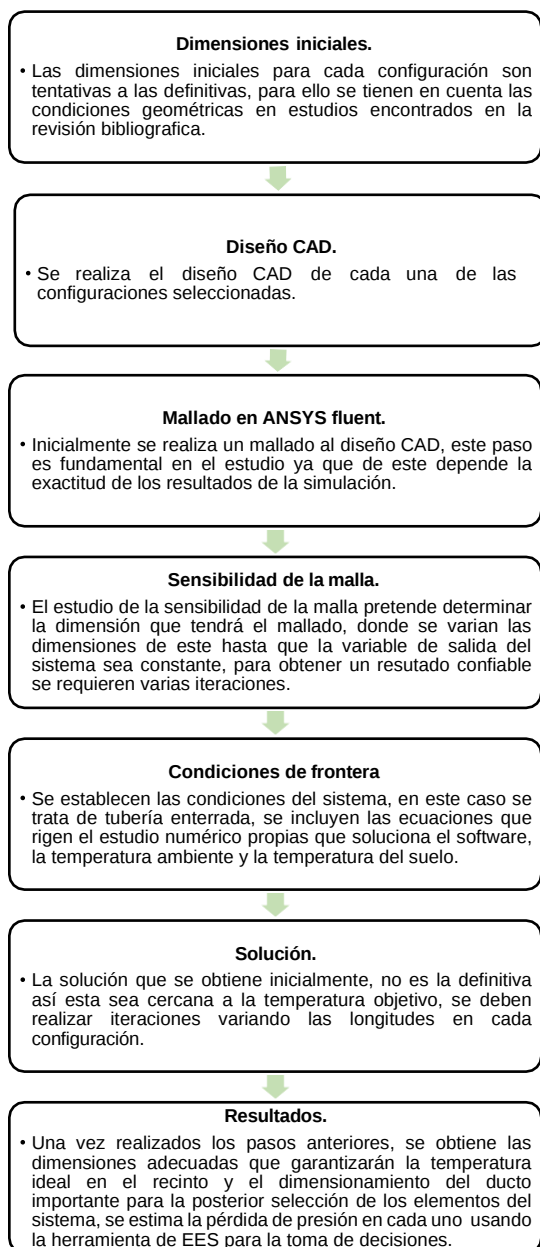


Figura 16. Metodología para desarrollar el objetivo 3.
Fuente: Autor.

8. ANALISIS Y RESULTADOS.

8.1. Caracterización de la vivienda.

El diseño del intercambiador aire tierra se llevó a cabo para una vivienda unifamiliar ubicada en la comuna 7 de Villavicencio, la ubicación geográfica satelital de la vivienda se muestra en la figura 17.



Figura 17. Ubicación geográfica de la vivienda.
Fuente:[49].

La vivienda cuenta únicamente con una planta y unas dimensiones externas de 12 metros de largo, 7 metros de ancho y 3 metros de alto. Se distribuye como se muestra en la figura 18, esto con el fin de determinar las renovaciones de aire necesarias relacionando los ambientes que existen en la vivienda.

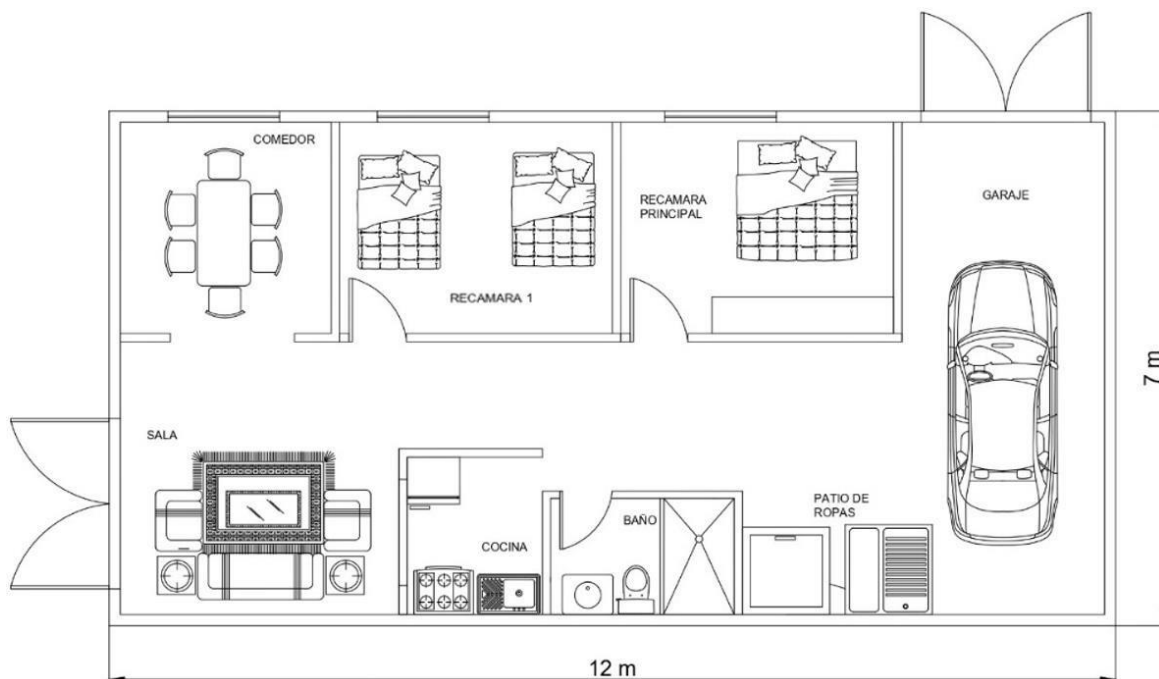


Figura 18. Condiciones físicas de la vivienda.

Fuente: Autor.

Debido a que no se tienen datos del tipo de suelo específico del cual se compone el suelo para la ubicación de la vivienda, se tomara como referencia un estudio realizado por Civilab ingeniería S.A.S (laboratorio de suelos concretos y pavimentos), donde realizaron diversas exploraciones de campo en la urbanización rincón de las margaritas en el municipio de Villavicencio, construyeron el perfil estratigráfico del subsuelo, evidenciando que a los 5 metros existe un conglomerado rocoso con bolos de gran tamaño, anterior a esta profundidad se define que el tipo de suelo es limo arcilloso con poca grava [50]. De acuerdo con el estudio mencionado, para el presente estudio se define como roca sedimentada Limolitas y argilitas, ya que es la que mejor se acerca a la descrita en el perfil estratigráfico del subsuelo. Las condiciones del suelo y características de la vivienda se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de la vivienda y suelo.

Ítem	Valor
Área construida m ²	84
Altitud (m)	390
Longitud	-73,61
Tipo de suelo	Limolitas y argilitas
Conductividad térmica [W/mK]	1,1
Capacidad máxima volumétrica [MJ/m ³ k]	2,1

Fuente: Autor

8.2. Caudal del aire a enfriar.

La renovación de aire es necesaria para obtener un sistema de enfriamiento eficiente, la suma de las renovaciones de aire que se estiman para la vivienda determina el caudal de aire necesario para ingresar a la vivienda, una vez obtenido este requerimiento, se decide el diámetro de la tubería que garantiza este mismo.

Las renovaciones de aire necesarias para cada estancia de la vivienda se determinan según la DIN 1946; las renovaciones de aire no se tienen en cuenta para las dependencias como baños, patios y garajes, estas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Renovaciones de aire y caudal necesario.

Estancias	Renovaciones de aire por hora	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Caudal de aire necesario (m ³ /h)
Sala - comedor	2	19	57	114
Cocina	3	6	18	54
Habitación principal	1	16	48	48
Habitación secundaria	1	12	36	36
Total	7	53	159	252 o 0,07 m ³ /s

Fuente: Elaborado a partir de la norma DIN 1946.

Adicionalmente se determina el caudal de renovación de aire requerido para la vivienda de acuerdo con la ASHRAE, donde se definen las siguientes condiciones para un apartamento como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Renovaciones de aire de acuerdo con la ASHRAE.

Aplicación	Recomendado	Mínimo	Mínimo
	Pie ³ /min por persona	Pie ³ /min por persona	Pie ³ / min por pie ²
Apartamento	20	15	0,33

Fuente:[48].

De acuerdo con la norma, se determina la ocupación máxima de personas, donde para este tipo de requerimientos es de 10 personas máximo en 1000 ft² con un requerimiento de 25 CFM por persona, por lo cual, según el área de estudio, tiene una capacidad máxima de 9 personas y requiere 225 CFM o 0,11 m³/s para una renovación adecuada.

Relacionando la tabla 5, según lo recomendado, se requieren 180 CFM ($0,08 \text{ m}^3/\text{s}$), mínimo 135 CFM ($0,06 \text{ m}^3/\text{s}$) y mínimo en relación con el área 188 CFM ($0,09 \text{ m}^3/\text{s}$). Para efectos de cálculo, se selecciona el valor recomendado de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ ($288 \text{ m}^3/\text{h}$).

8.3. Condiciones climáticas externas.

Se realiza la recolección de datos de temperatura usando la base de datos del IDEAM [51], se selecciona la estación meteorológica cercana a las coordenadas del sitio a evaluar además de tener en cuenta la cantidad de datos disponibles. Para este caso se elige la estación de “Aeropuerto vanguardia”; las características de la estación se muestran en la tabla 6.

Los datos de temperatura seca se descargaron para el año 2022, datos diarios para las 24 horas, mostrados en la tabla 7 y en el anexo 1 se encuentran los datos descargados, de acuerdo con estos se estima la temperatura promedio, máxima y mínima que hubo en Villavicencio para el año mencionado.

Tabla 6. Características de la estación meteorológica seleccionada.

AEROPUERTO VANGUARDIA [35035020]	
Código	35035020
Nombre	AEROPUERTO VANGUARDIA
Categoría	Agrometeorológica
Longitud	-73,62
Latitud	4,17
Altitud	422
Departamento	Meta
Municipio	Villavicencio
Estado	Activa
Tecnología	TEST003
Fecha de instalación	15/10/1924

Fuente:[51].

Tabla 7. Temperatura media, mínima y máxima en Villavicencio año 2022.

Mes	T VVC °C	T Min °C	T Max °C
Enero	26,86	21,2	33,3
Febrero	27,05	20,6	35,2
Marzo	26,61	21,2	32
Abril	25,73	21	32,4
Mayo	25,16	20,5	31,1
Junio	24,57	20	31
Julio	25,26	20,8	30,2
Agosto	25,38	19,4	33
Septiembre	25,66	19,4	31,8
Octubre	26,02	20,6	31,6
Noviembre	25,24	18,8	31,6
Diciembre	26,26	20,4	32,8
Total	25,79	18,8	35,2

Fuente: Autor.

A partir de los datos meteorológicos mostrados en la tabla 7, se realizó un análisis estadístico con ayuda del software de Minitab con el fin de determinar la distribución y verificar la media de la temperatura en Villavicencio. En la figura 19, se muestra un histograma para la temperatura de Villavicencio a lo largo del año 2022.

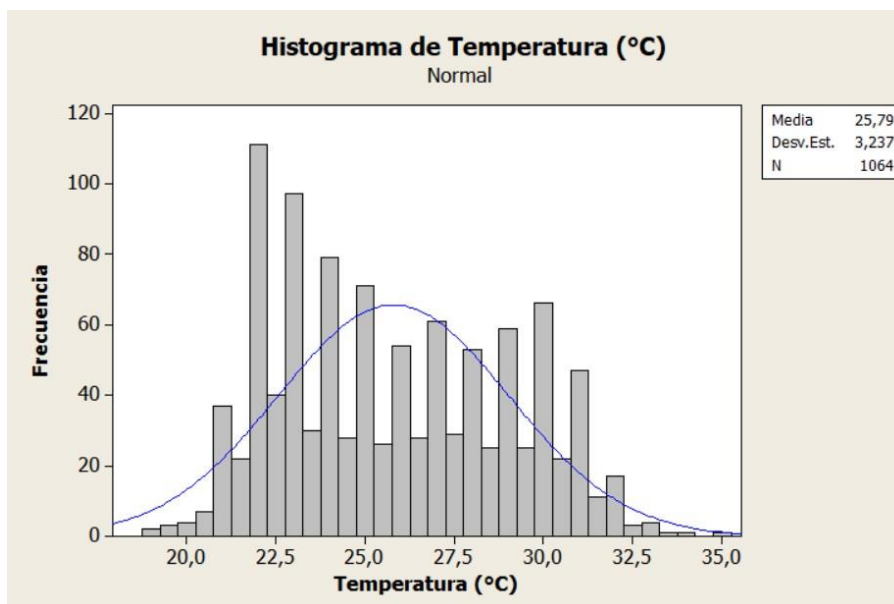


Figura 19. Histograma de temperatura de Villavicencio en el año 2022.

Fuente: Autor.

En el histograma se observa que los datos no obtienen una tendencia de distribución normal de buena calidad, por el contrario, los datos tienen un sesgo hacia la cola

izquierda, donde la frecuencia de los valores de temperatura generados en la región se encuentra en un rango de 21,75 a 26.25°C con una frecuencia de 111 a 54 respectivamente, además se muestra el valor de la media de 25.79 °C el cual se encuentra dentro de este rango. También se observa que existe un dato en la cola derecha que es atípico y toma el valor de 35°C.

Adicionalmente se generó una gráfica de caja para la temperatura en cada mes del 2022. Aquí se espera observar la distribución de los datos en cada mes. También se generaron graficas de distribución en diferentes intervalos de temperatura lo cual brinda una percepción clara de la tendencia de datos. Estas son mostradas en la figura 20, 21 y 22.

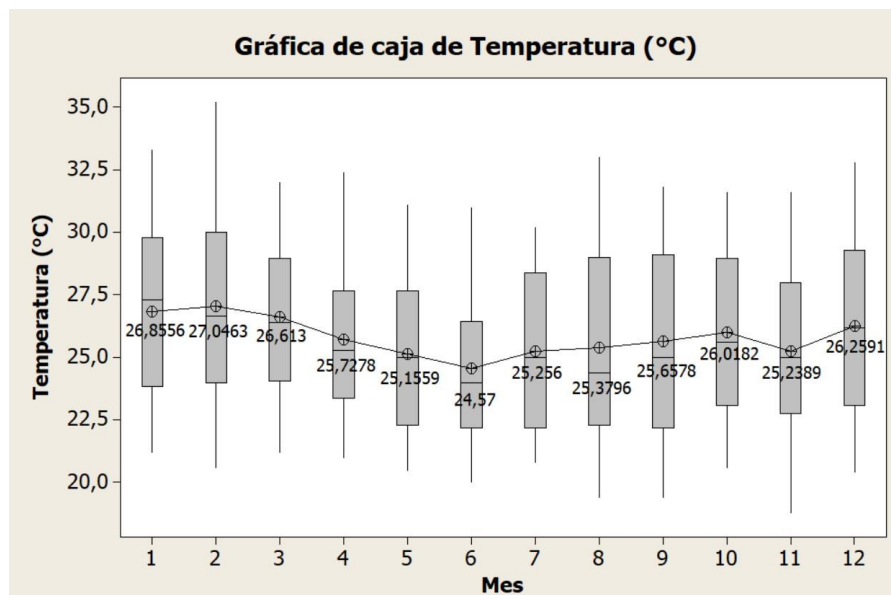


Figura 20. Gráfica de caja de la temperatura en Villavicencio en el año 2022.
Fuente: Autor.

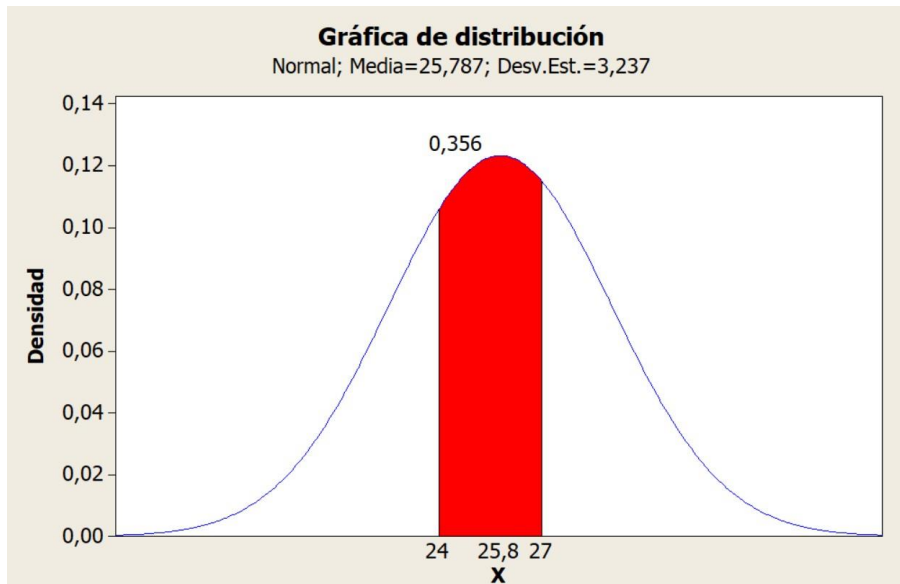


Figura 21. Distribución de temperatura en el rango del promedio mensual.
Fuente: Autor.

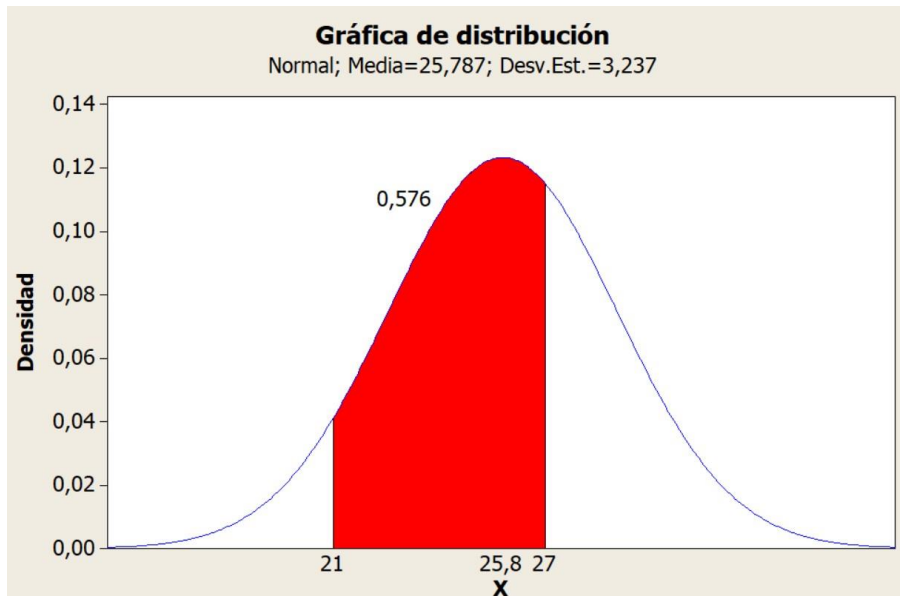


Figura 22. Distribución de temperatura en un rango de 21 a 27 °C.
Fuente: Autor.

De acuerdo con la figura 20, se evidencia que la media en cada uno de los meses no es igual, encontrándose en un rango de 24.57 a 27.04 °C los cuales pertenecen al 35% de los datos recolectados como se mostró en la figura 21. Además, para cada mes se muestra la tendencia de los datos esto de acuerdo con cada una de las cajas, donde la mayoría obtiene una asimetría positiva, es decir que los datos se concentran hacia la parte superior de la distribución, lo que simboliza que los datos de temperatura contenidos en estas tienden a ser mayores.

Por otra parte, en la figura 22 se observa que el 57.6% de los datos recopilados de la estación meteorológica corresponden a temperaturas entre 21 y 27 °C, siendo este el intervalo con la mayor frecuencia de ocurrencia en el histograma.

Relacionando lo anterior, en la ciudad de Villavicencio no existe una temperatura homogénea, esto consecuencia del cambio climático y sus fenómenos, considerando que es una región donde constantemente existe una variación en las condiciones climáticas por la presencia de lluvias y sequías en diferentes épocas del año, dificultando obtener una temperatura homogénea.

Para determinar la temperatura del suelo, el modelo requiere como variable la temperatura promedio que hay en sitio, para efectos de este cálculo se tendrá en cuenta la temperatura media anual que es de 25.79 °C.

Por otro lado, se selecciona como día crítico para el diseño, el día 22 de febrero donde la temperatura promedio en este día fue de 31,55 °C, se selecciona el promedio del día ya que así se dimensiona el sistema para condiciones críticas abarcando temperaturas comunes a lo largo del año, teniendo en cuenta la figura 22 donde muestra que el 57,6% de los datos de temperatura se encuentran por debajo de los 27°C.

8.4. Temperatura del suelo.

La temperatura del suelo se define conforme al modelo matemático presentado anteriormente. Se evaluó la temperatura del suelo en diversas profundidades: 0, 2, 5, 8, 10 y 30 metros, con el propósito de determinar la profundidad donde la temperatura tiende a ser constante. La figura 23 muestra la oscilación de la temperatura del suelo en función de la profundidad. En el anexo 2 se muestra la temperatura del suelo de forma detallada.

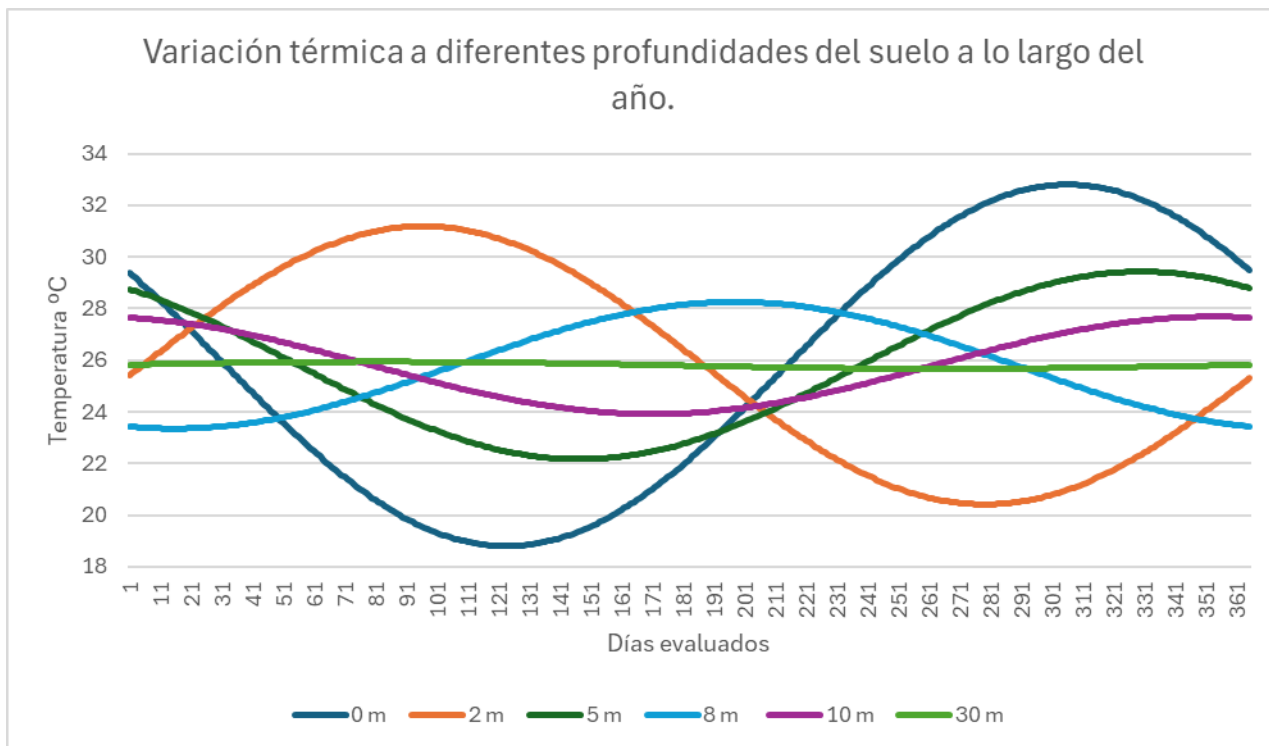


Figura 23. Variación térmica en diferentes profundidades.
Fuente: Autor.

A partir de la variación térmica definida bajo las condiciones de profundidad, donde a medida que aumenta la profundidad, la temperatura del suelo se vuelve estable acercándose a la temperatura media del sitio, también se evidencia que a una profundidad de 30 metros la temperatura tiene poca variación permaneciendo constante. En la tabla 8 se muestra la temperatura mínima, máxima y promedio en cada una de las profundidades evaluadas.

Tabla 8. Temperatura mínima, promedio y máxima en diferentes profundidades del suelo.

Suelo Limolitas y argilitas						
Profundidad	Superficie	2 metros	5 metros	8 metros	10 metros	30 metros
Min	18,8	20,42	22,17	23,35	23,92	25,66
Max	32,8	31,18	29,43	28,25	27,68	25,94
Amplitud	14	10,76	7,26	4,9	3,76	0,28
Promedio	25,8002	25,7997	25,7998	25,8001	25,8000	25,8001

Fuente: Autor.

De acuerdo con la tabla anterior, se demuestra que la temperatura promedio en cada una de las profundidades evaluada es aproximada a la media en Villavicencio la cual es de 25,79 °C y existe una variación de temperatura de aproximadamente 14 °C en la superficie y disminuye a medida que aumenta la profundidad, en este

proyecto de investigación se usara la temperatura para una profundidad de 10 metros ya que se percibe una menor amplitud en la temperatura con un valor de 3,76 °C, una variación mínima de temperatura es ideal para mantener las condiciones del suelo o el gradiente geotérmico constante logrando una mejor transferencia de calor. Seleccionar una profundidad de 30 metros solo genera una variación de 0,28 °C donde la diferencia entre esta variación a 10 metros no es significativa para adicionar 20 metros más de profundidad lo cual incrementaría el costo de la obra civil.

Teniendo en cuenta que se requiere definir las condiciones de temperatura del suelo para los 10 metros de profundidad, en la tabla 9, se muestra la temperatura mínima, promedio y máxima mensual para esta profundidad.

Tabla 9. Temperatura del suelo a 10 m de profundidad.

Mes	Mín. de 10 m	Máx. de 10 m	Promedio de 10 m
Enero	27,2	27,64	27,46
Febrero	26,46	27,18	26,84
Marzo	25,47	26,43	25,96
Abril	24,6	25,44	25,00
Mayo	24,03	24,57	24,27
Junio	23,92	24,02	23,94
Julio	23,95	24,36	24,12
Agosto	24,38	25,18	24,76
Septiembre	25,21	26,14	25,68
Octubre	26,18	27,04	26,63
Noviembre	27,06	27,58	27,35
Diciembre	27,59	27,68	27,66
Total,	23,92	27,68	25,80

Fuente: Autor.

En la tabla 9 se observa que la temperatura promedio mensual mínima alcanzada por el suelo fue en el mes de junio con un valor de 23,92 °C y se selecciona como condición de frontera en el estudio, dado que se genera una variación máxima de temperatura permitiendo una exigencia mayor al evaluar el comportamiento del sistema. Si se eligiera una temperatura del suelo más alta a la seleccionada facilitaría la transferencia de calor entre la tubería enterrada y el aire exterior.

8.5. Configuración del sistema ICTA.

De acuerdo con la investigación realizada, existen diferentes configuraciones de tubería enterrada de forma horizontal, en esta existe mayor flexibilidad en la disposición del colector geotérmico, entre ellos el sistema en anillo, techelman y

serpentín, estos se instalan a una profundidad que varía entre 1 y 10 metros con diámetros desde 1", en este caso, el gradiente geotérmico disminuye desde la superficie del suelo hasta la temperatura neutra o constante la cual se encuentra en un rango de profundidad de 2 a 40 metros de profundidad según las condiciones del sitio [21].

Para llevar a cabo la selección de las configuraciones del sistema que serán evaluadas, es indispensable la investigación bibliográfica de estudios a nivel global y regional sobre los ICTA, donde realizaron diseño, estudios numéricos y/o experimentales bajo una configuración horizontal. Teniendo en cuenta las configuraciones mostradas en el estado del arte, se encontró que, se evaluaba con gran frecuencia la configuración en "serpentín", mostrada en la figura 6 anteriormente, es por lo que es seleccionada para su evaluación.

Con el objetivo de comparar costos de material y rendimiento, se selecciona otra configuración usada con frecuencia y es tipo "techelman".

8.6. Diámetro requerido para el sistema.

El diámetro requerido para el sistema se define de acuerdo con el caudal de aire necesario, con el fin de asegurar este mismo en el recinto. Usando la ecuación de flujo volumétrico $V = V_{prom} * A_c$, donde el termino A_c es el área transversal y se expresa así $A = \frac{\pi D^2}{4}$, en el caso de la velocidad se seleccionan valores dentro del

rango de baja velocidad para sistemas de distribución por conductos de ventilación [52], obteniendo los valores de diámetro mostrados en la tabla 10 a continuación.

Tabla 10. Velocidad y diámetro requerido.

Caudal m³/s	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	Diámetro (in)
0,08	3	0,1843	7,3
	4	0,1596	6,3
	5	0,1427	5,6

Fuente: Autor.

Considerando que los parámetros y condiciones seleccionados son similares a los que se utilizarían en la implementación real, se opta por una tubería comercial de 6" de diámetro.

8.7. Condiciones del sistema a estudiar.

Para llevar a cabo el estudio numérico, es necesario realizar una serie de iteraciones que involucran la variación de la longitud del sistema de intercambio de calor aire tierra. Se define el material de la tubería, las longitudes del sistema a evaluar, las propiedades del aire, el diámetro de la tubería y las condiciones de temperatura

exteriores y del suelo; en la tabla 11 se muestran las propiedades del fluido de trabajo.

Tabla 11. Propiedades del aire a 1 atm a 20°C.

Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)	Conductividad térmica (W/mk)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
1,2	1007	0,02	1,5x10 ⁻⁵

Fuente: Autor

Para la selección del material se tuvo en cuenta el costo de los materiales que cuentan con disponibilidad del diámetro de 6" comercialmente, el PVC es uno de los materiales que satisface esta condición y tiene un costo aproximado de \$207.000 COP por 6 metros y la tubería en material acero inoxidable también cuenta con diámetros de 6" pero con un costo mayor, aproximadamente \$980.000 COP [53], [54].

Por esta razón, se selecciona tubería de PVC para el estudio, debido a su costo y disponibilidad. Se presentan las propiedades de la tubería en la tabla 12, y las características específicas según los resultados obtenidos en la sección 8.6 se detallan en la tabla 13.

Tabla 12. Propiedades de tubería PVC comercial para su estudio numérico.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mk)	Aspereza	Calor específico (J/kgK)
PVC	1380	0,17	0,0015	900

Fuente: Autor.

Tabla 13. Diámetro de tubería seleccionada.

Diámetro nominal (in- m)	Espesor de pared mínimo (m)	Diámetro interno (m)
6" - 0,168	0,00803	0,1522

Fuente: Autor.

De acuerdo con la tabla anterior y el diámetro seleccionado, se determina la velocidad del fluido con un valor de 4,3 m/s, cumpliendo con el requerimiento de caudal y se ajusta a los criterios de diseño para la velocidad en ductos de aire, situándose dentro del rango considerado como baja velocidad.

Para el caso de la longitud, esta depende exclusivamente del área que se va a enfriar, en diferentes investigaciones se realizaron estudios con longitudes de 10 m hasta 100 m o más [55]. En este caso, se seleccionan longitudes de forma aleatoria para posteriormente realizar su modelado numérico. Las configuraciones con las longitudes seleccionadas se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Longitudes para evaluar en cada configuración.

Geometría	1	2
Longitud (m)	18	32
	30	48
	42	60

Fuente: Autor

Por otra parte, se define el tipo de flujo que existe en el sistema, de acuerdo con la ecuación 5 se determina el número de Reynolds, los resultados se muestran en la tabla 15 y se define que el tipo de flujo es turbulento.

Tabla 15. Tipo de flujo en la tubería.

Tubería PVC		
Diámetro (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds
0,1522	4,397	44616

Fuente: Autor.

Las condiciones climáticas que serán usadas para evaluar el sistema se detallan en la tabla 16.

Tabla 16. Condiciones climáticas para evaluar el ICTA.

Día	T prom día (°C)	T suelo a 10 m (°C)
22 de febrero	31,55	23,92

Fuente: Autor.

8.8. Cálculo teórico para determinar las dimensiones del ICTA.

De acuerdo con los parámetros seleccionados, se realiza el cálculo teórico para definir la longitud del sistema y eficiencia en relación con la temperatura para cada una de las longitudes, teniendo en cuenta las condiciones mostradas en el apartado anterior. Para llevar a cabo la solución del sistema se usan las ecuaciones mostradas en el marco teórico y para facilitar el cálculo y sus iteraciones, se hace uso de la herramienta computacional EES (Engineering Equation Solver), su configuración es mostrada en el anexo 3.

Aplicando las condiciones de temperatura y parámetros de diseño, se muestran los resultados de la configuración 1 y 2 en la tabla 17 y 18.

Tabla 17. Resultados calculo teórico configuración 1.

Longitud (m)	T in (°C)	T suelo (°C)	T out (°C)	ΔT	Eficiencia %
Configuración 1					
18	31,55	23,92	26,03	2,114	72,35
30			24,82	0,8981	88,2
42			24,3	0,3816	95,02

Fuente: Autor.

En la tabla 17 se evidencia que para la longitud de los 18 m tiene una diferencia en alcanzar la temperatura del suelo de 2,114 °C y una eficiencia del 72,35%. Por otra parte, los 42 m logran una eficiencia de 95,02% y una temperatura de salida del aire de 24,2 °C con una diferencia de la temperatura del 0,38 °C.

La diferencia de la eficiencia entre la longitud de 18 y 30 m es de 15,85% donde la longitud aumenta 12 m. Para el caso de la longitud de 30 y 42 m existe una diferencia de 6,82%, en este caso la eficiencia no aumenta notablemente. Para el diseño se debe tener en cuenta la configuración que equivale a la disminución de costos y material manteniendo una mayor eficiencia.

Tabla 18. Resultados calculo teórico configuración 2.

Longitud (m)	T in (°C)	T suelo (°C)	T out (°C)	ΔT	Eficiencia %
Configuración 2					
32	31,55	23,92	24,7	0,7787	89,78
48			24,17	0,2488	96,72
60			24,03	0,1057	98,56

Fuente: Autor.

Para la configuración 2 bajo una longitud de 32 m obtiene una temperatura de 24,7 °C con una diferencia de 0,778 °C entre la temperatura del suelo y la de salida del aire. En cuanto a la longitud de 48 y 60 m existe una diferencia en la eficiencia de 1,84% en 12 m de tubería. Entre las longitudes evaluadas se obtiene mayor eficiencia en la longitud de 60 m.

8.9. Simulación del ICTA en ANSYS fluent.

8.9.1. Diseño CAD.

Se realiza el diseño para cada una de las longitudes definidas en la tabla 14, desde la aplicación de design modeler de ANSYS, estos se muestran en la figura 24, 25 y 26 para la configuración 1 y 27, 28 y 29 para la configuración 2.

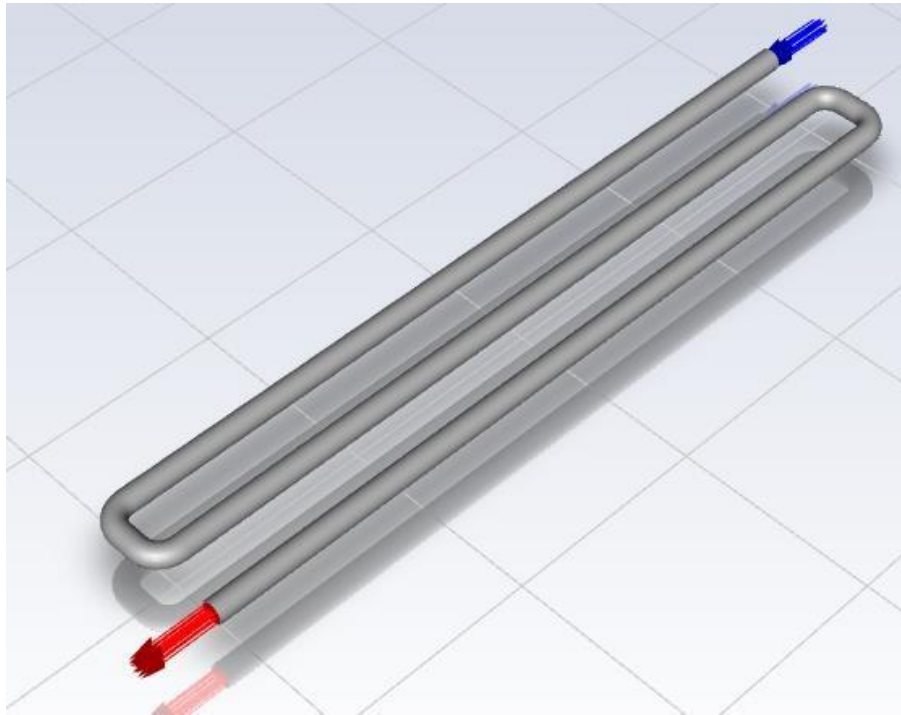


Figura 24. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 18 metros.
Fuente: Autor.

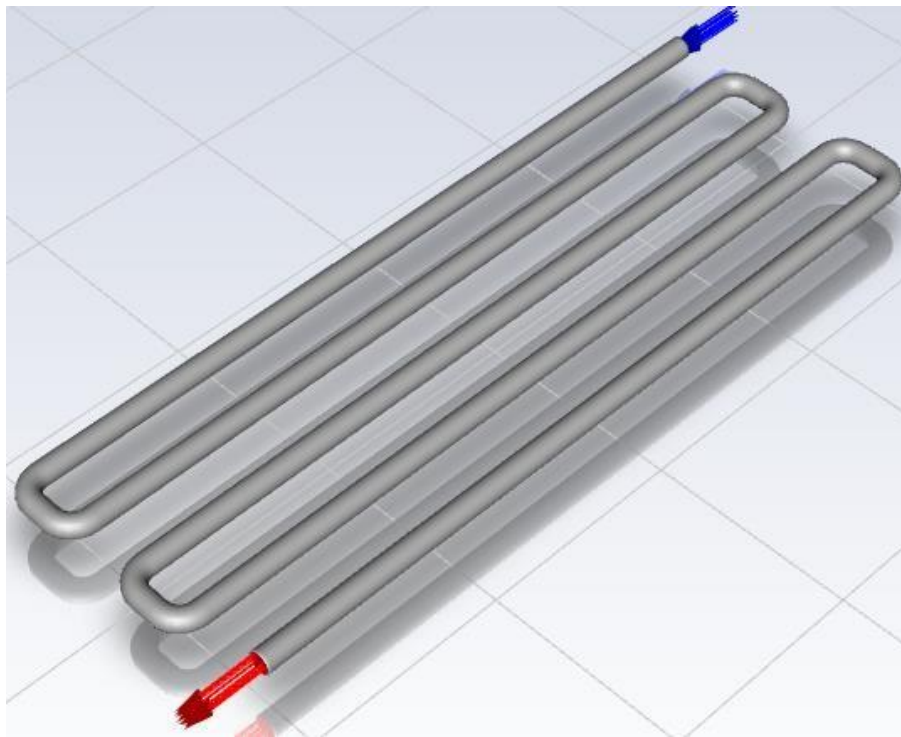


Figura 25. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 30 metros.
Fuente: Autor.

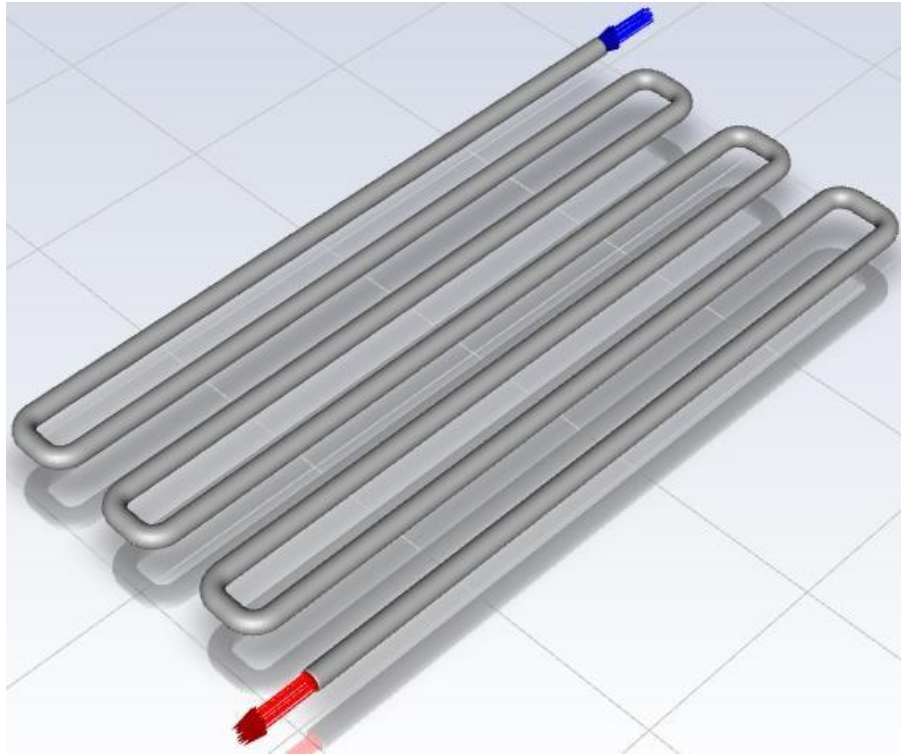


Figura 26. Diseño CAD para la configuración 1 longitud 42 metros.
Fuente: Autor.

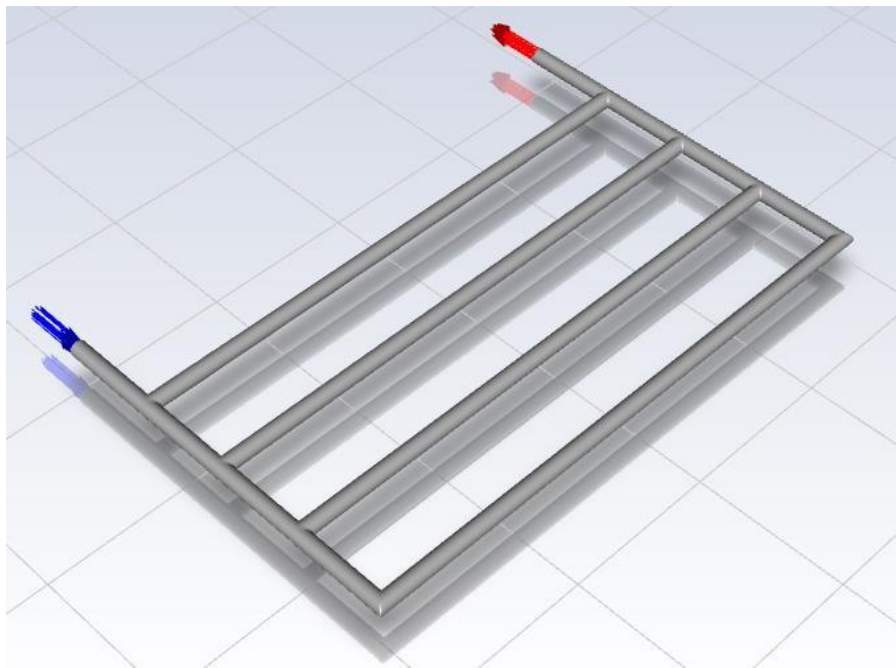


Figura 27. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 32 metros.
Fuente: Autor.

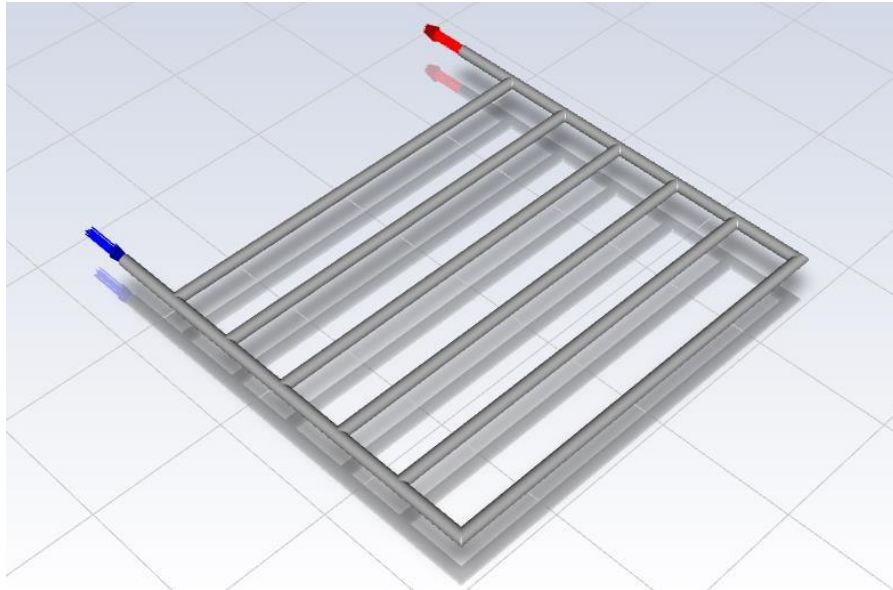


Figura 28. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 48 metros.
Fuente: Autor.

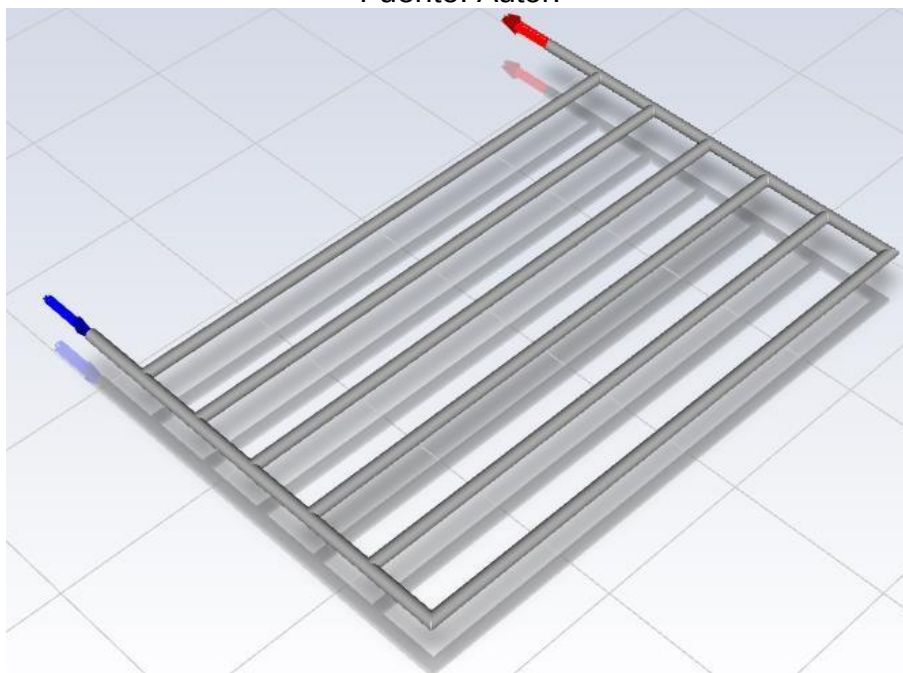


Figura 29. Diseño CAD para la configuración 2 longitud 60 metros.
Fuente: Autor.

8.9.2. Parámetros para el mallado.

Relacionando las condiciones del sistema y las configuraciones seleccionadas para la simulación. Inicialmente se realizará la simulación para una longitud específica

con el fin de seleccionar un tamaño de malla adecuado para cada configuración, las condiciones son mostradas en la tabla 19 a continuación.

Tabla 19. Dimensiones y condiciones iniciales para la configuración 1 y 2.

Configuración		1	2
Geometría	Longitud (m)	18	48
	Diámetro (m)	0,168	
	Espesor (m)	0,00803	
Entrada	Velocidad (m/s)	4,3	
	Temperatura (°C)	31,55	
Salida	Temperatura (°C)	23,92	

Fuente: Autor.

A continuación, en la tabla 20 se muestra los valores del tamaño del mallado donde será evaluado cada una de las configuraciones.

Tabla 20. Tamaño de mallado para cada configuración.

Mallado (m)	
Configuración 1	Configuración 2
Tipo: Mesh Element Size	Tipo: Mesh Element Size
0,01	0,015
0,012	0,02
0,02	0,025
0,025	0,03
0,03	0,05
0,05	0,08
0,08	0,1
0,1	0,2
0,2	

Fuente: Autor.

Se emplean tamaños de malla aleatorios para estimar el comportamiento del sistema, donde se determina el tamaño adecuado cuando la temperatura de salida del aire no genere cambios significativos.

En relación con la tabla 15 se especifica el tipo de flujo existente en la tubería; el cual es Turbulento, se debe determinar la configuración del modelo que llevara a cabo la solución del diseño del ICTA; uno de los modelos que comprende menor costo computacional y es de gran uso en la industria es el de ecuaciones diferenciales promediadas por Reynolds (RANS) y se clasifica como se muestra en la tabla 21. [56]

Tabla 21. Modelos de turbulencia RANS más comunes.

Cierre	Modelo	Ecuaciones adicionales	Características
EVM	Zero Equation Model	0	Método totalmente algebraico. Flujos libres: chorros, capas de mezcla y flujos externos sobre cilindros.
	Spalart-Allmaras	1	Aplicaciones aeroespaciales con flujos compresibles a altas velocidades.
	k- ϵ Standard	2	Robusto. Uso general.
	k- ϵ RNG	2	Flujos rápidamente deformados y turbulentos.
	k- ϵ Realizable	2	Chorros planos y cilíndricos, capas límite bajo fuertes incrementos de presión adversos, flujos con separación y recirculación.
	k- ω Standard	2	Bajos números de Reynolds, contornos de pared, capa límite y flujos no estacionarios.
	k- ω SST	2	Incrementos de presión adversos en perfiles aerodinámicos y ondas de choque transitorio.
RSM	Tensiones de Reynolds	7	Flujos tridimensionales complejos con elevada turbulencia y rotación. Requiere elevada potencia de cálculo y capacidad de memoria.

Fuente:[56]

De acuerdo con la tabla anterior se define el modelo de turbulencia k-epsilon por su uso general y es apropiado para flujos internos y limitados por paredes con gradientes de presión media pequeños [59]; de igual manera si se usa el modelo k-omega también se obtendrían resultados confiables ya que su uso es recomendado en estudios aerodinámicos y su función en la separación del fluido en una superficie lisa es adecuada [56], [57]

Todos los parámetros diferentes a la longitud a evaluar son los mismos para cada diseño, en el anexo 5 se muestran los parámetros configurados en ANSYS fluent.

8.9.3. Mallado del modelo.

El mallado es la primera parte que se lleva a cabo en una simulación fluidodinámica y es fundamental ya que esta describe los nodos de cada volumen de control, donde se solucionan las ecuaciones de gobierno para flujo en ductos y transferencia de calor que fueron descritas en las ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19, lo cual genera soluciones pertinentes con el uso adecuado de los recursos.

De acuerdo con la tabla 19, se realiza una primera iteración para así posteriormente determinar el mallado que mejor se acople a las configuraciones y se logra realizando cambios en el tamaño del mallado, tomando valores aleatorios donde se evalúan tamaños menores y mayores como se establecieron en la tabla 20 y se define como sensibilidad de malla.

El mallado de la configuración 1 se adapta de forma hexaédrica estructurado y en la configuración 2 de forma tetraédrica estructurada, como se muestra en la figura 30 y 31 respectivamente.

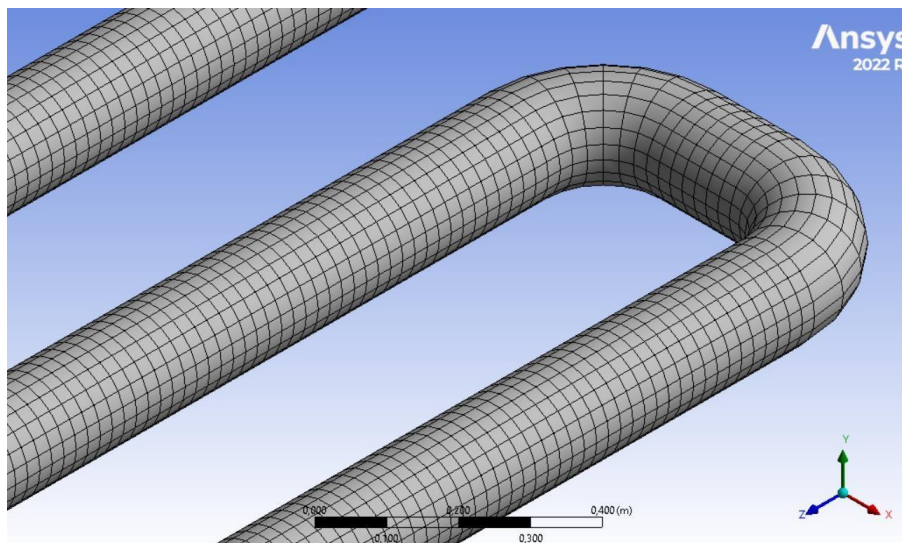


Figura 30. Malla configuración 1 para su estudio numérico.
Fuente: Autor.

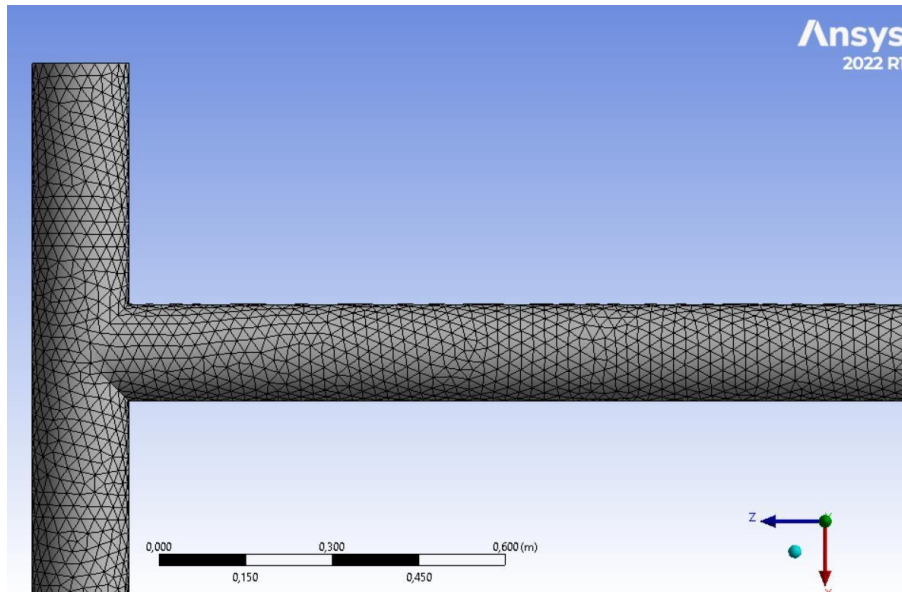


Figura 31. Malla configuración 2 para su estudio numérico.
Fuente: Autor.

La sensibilidad de la malla para la configuración 1 y 2 se ilustra en las figuras 32 y 33 respectivamente, confirmando que el parámetro de salida, en este caso, la temperatura en la salida de la tubería se mantiene constante o experimenta cambios insignificantes al variar el tamaño de la malla lo cual puede aumentar o mitigar la cantidad de nodos que se evalúan. Este hallazgo resulta beneficioso para las simulaciones, ya que permite utilizar los recursos de manera eficiente.

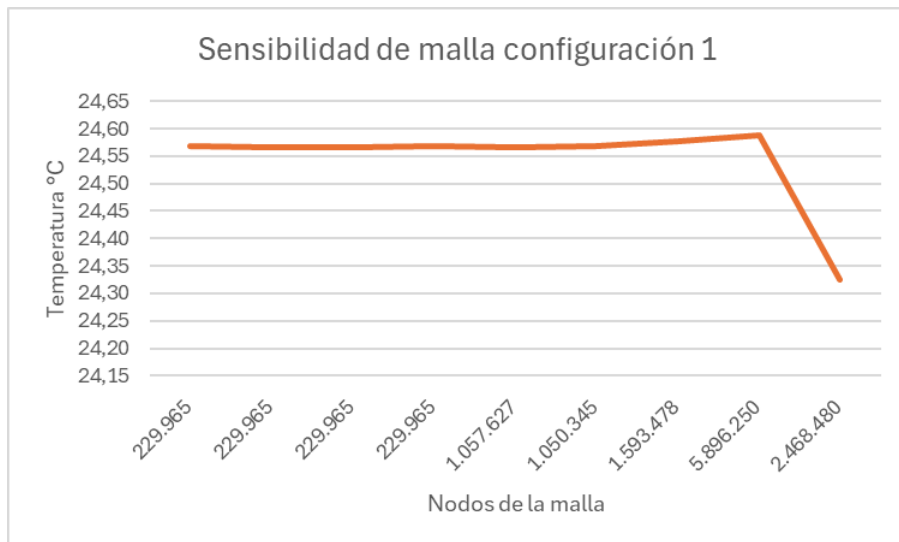


Figura 32. Sensibilidad de malla configuración 1.
Fuente: Autor.

Bajo las condiciones de la configuración 1, según los datos proporcionados en la tabla 19, se realizaron evaluaciones de tamaño de malla de acuerdo con los tamaños estipulados en la tabla 20. La figura 32 ilustra que, al emplear una malla menos densa, la temperatura de salida del modelo permanece constante hasta que se alcanza un tamaño de malla más fino, lo que resulta en un aumento en el número de nodos para su evaluación. Sin embargo, no se observa una estabilización de esta temperatura conforme se reduce el tamaño de la malla.

Por consiguiente, se selecciona un valor de 0.025 (m) como tamaño de malla, logrando 1.050.345 nodos para su evaluación, siendo este una malla menos rigurosa al tamaño de menor valor, pero fina en comparación con las otras iteraciones.

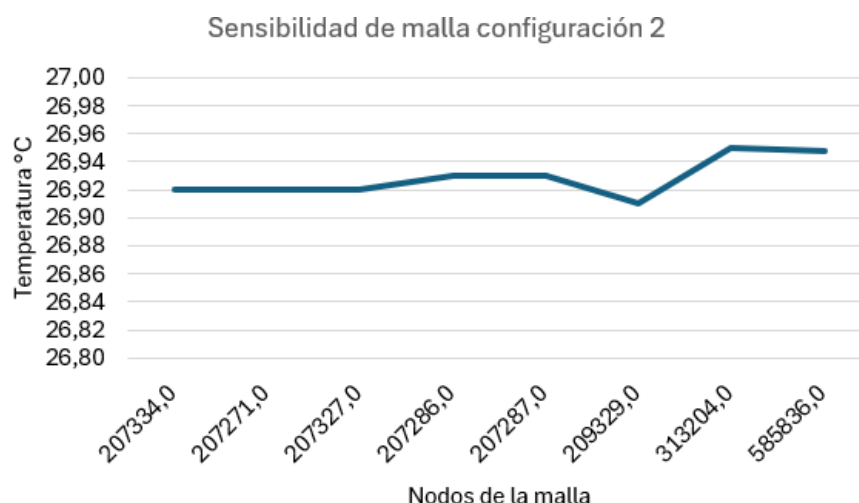


Figura 33. Sensibilidad de malla configuración 2.
Fuente: Autor.

En este análisis, se itero el tamaño de malla de acuerdo con la tabla 20, teniendo en cuenta la complejidad de la geometría y su consecuente demanda computacional.

Los resultados, representados en la figura 33, muestran que, al reducir el tamaño de la malla, no se logra igualar la temperatura del aire a la salida de la tubería con la del suelo, establecida en 23,92 °C. A pesar de ello, al evaluar los diferentes tamaños malla se obtiene una temperatura de 26,92 °C, con un total de 207.287 nodos evaluados y un tamaño de malla de 0,03 (m). Este tamaño de malla se empleará en siguientes iteraciones.

Los resultados específicos en cada configuración se muestran en el anexo 4.

8.9.4. Temperatura del aire en la salida de los sistemas simulados.

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de sensibilidad de malla, así como las condiciones de frontera y geométricas especificadas en el subcapítulo 8.7, se procedió a realizar las iteraciones de cada configuración para el día seleccionado como crítico 22 de febrero.

8.9.4.1. Modelado del ICTA para la configuración 1.

Se evalúan las condiciones de frontera y geométricas para la configuración 1, obteniendo los contornos de temperatura en °C mostrados en la figura 34, 35 y 36 a continuación.

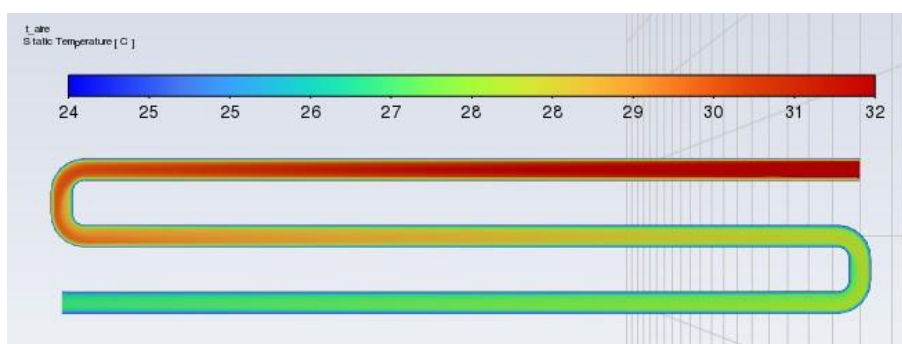


Figura 34. Temperatura del sistema para 18 m de longitud en la configuración 1.
Fuente: Autor.

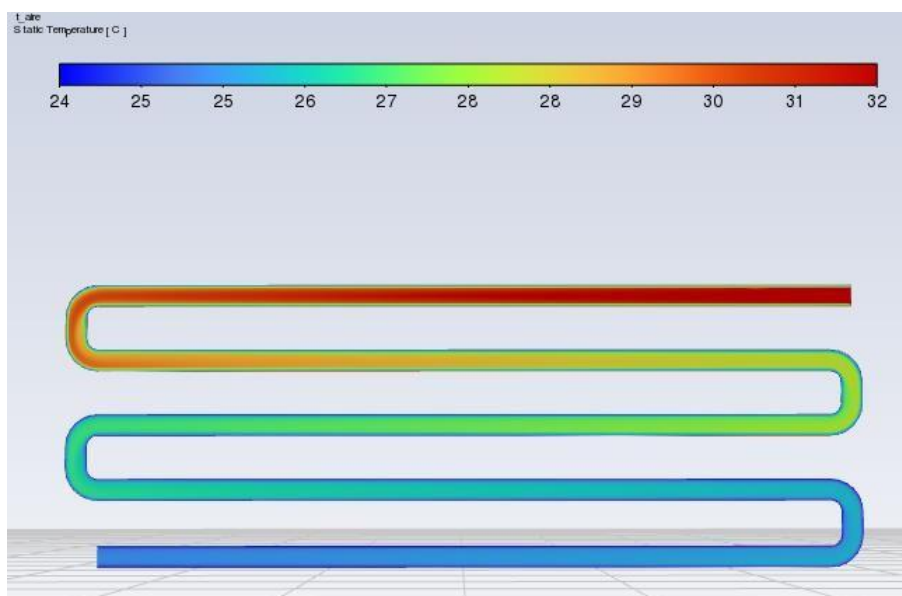


Figura 35. Temperatura del sistema para 30 m de longitud en la configuración 1.
Fuente: Autor.

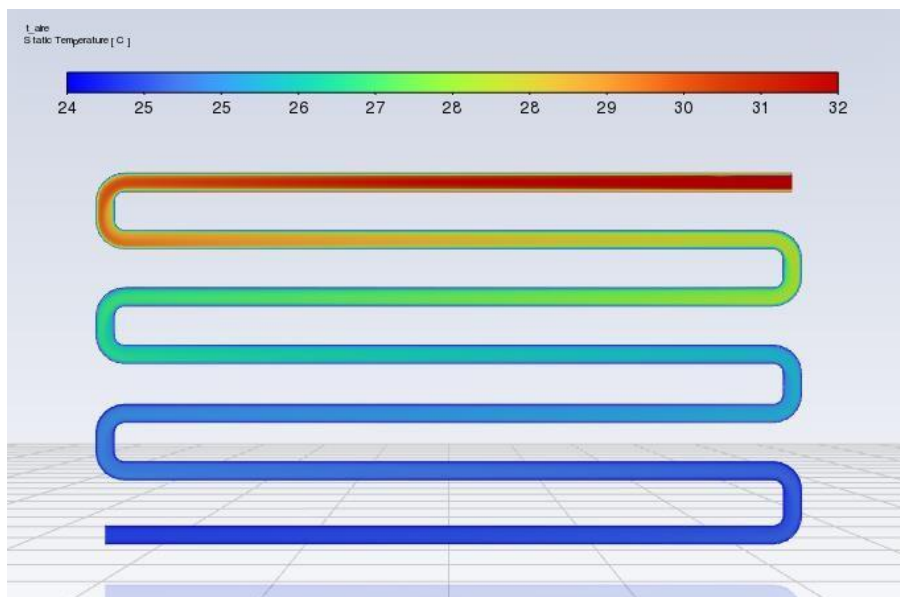


Figura 36. Temperatura del sistema para 42 m de longitud en la configuración 1.
Fuente: Autor.

En las figuras anteriores, se observa la incidencia de la temperatura del aire con un valor inicial de $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La longitud de entrada hidrodinámica es de $1,68\text{ m}$; a partir de esta distancia, el flujo se encuentra completamente desarrollado de manera turbulenta. A medida que el aire avanza por la tubería, se produce un intercambio térmico entre el aire y la tubería, evidenciándose una disminución de la temperatura al aumentar la longitud de la tubería.

Para una longitud de 18 m , se logra reducir la temperatura de entrada de $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $27,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura de salida del aire $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el caso de una configuración con 30 m de longitud, se obtiene un mejor resultado, con una diferencia de temperatura de $1,64\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente, para una longitud de 42 m , la temperatura de salida del aire alcanza los $24,77\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para cada una de las longitudes simuladas para la configuración 1, se realizaron 1000 iteraciones las cuales fueron suficientes para que se lograra la convergencia del modelado.

En la figura 37 se muestra una gráfica comparativa entre la temperatura de entrada, temperatura del suelo y la temperatura a la salida del sistema para las tres longitudes simuladas.

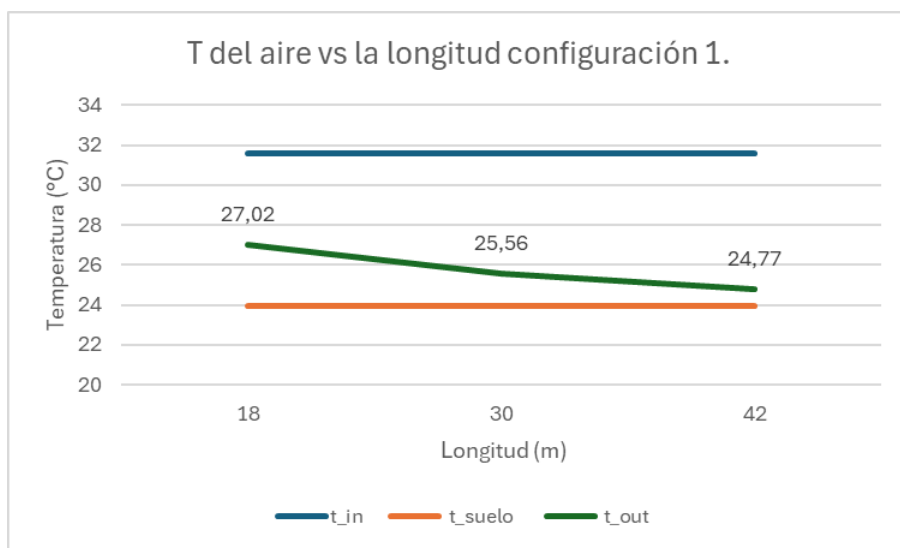


Figura 37. Comparación de las condiciones propuestas con la temperatura de salida del aire para la configuración 1.

Fuente: Autor.

En la figura 37 se observa que para los 18 m de longitud el sistema logra disminuir considerablemente la temperatura de entrada, pero no obtiene el mejor rendimiento, alcanzando 27,02 °C de temperatura de salida del aire y una eficiencia del 59,37%, por otra parte, las longitudes de 30 y 42 m especifican que se logra una menor temperatura de salida del aire, considerando una eficiencia del 78,51% y 88,86% respectivamente, en este sentido la eficiencia aumenta 10,35%.

8.9.4.2. Modelado del ICTA para la configuración 2.

De acuerdo con las condiciones mostradas anteriormente para la configuración 2, los resultados de temperatura a la salida del sistema se muestran en la figura 38, 39 y 40 a continuación.

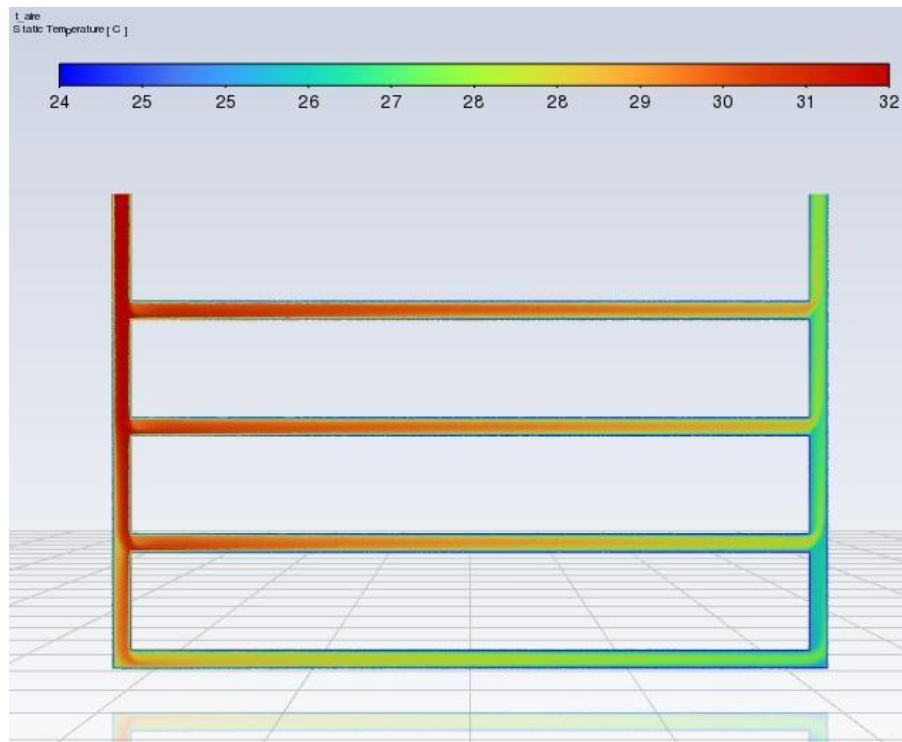


Figura 38. Temperatura del sistema para 32 m de longitud en la configuración 2.
Fuente: Autor.

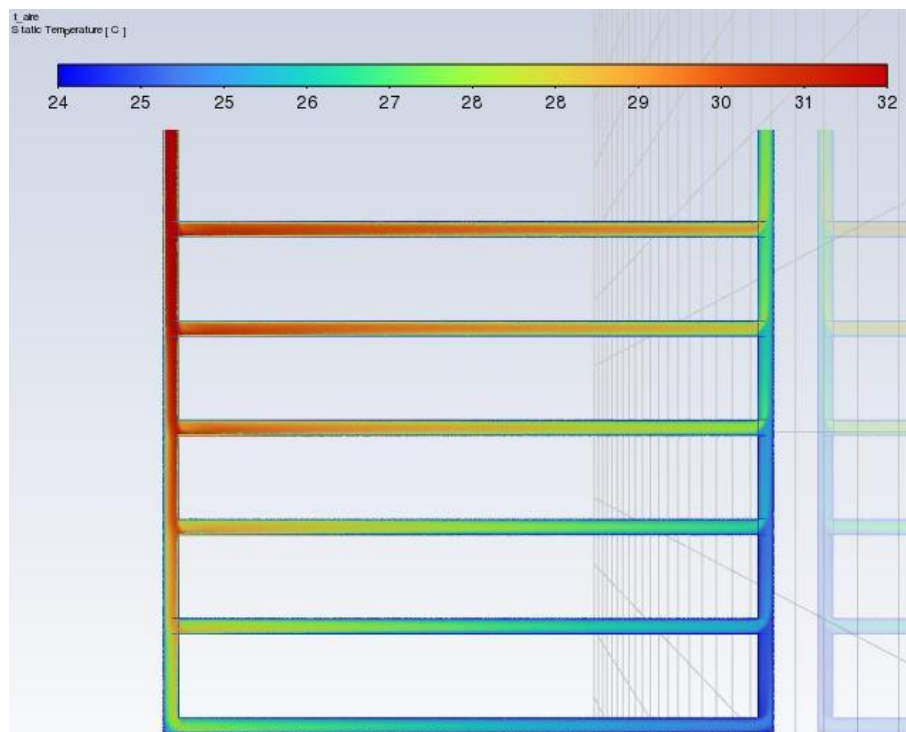


Figura 39. Temperatura del sistema para 48 m de longitud en la configuración 2.

Fuente: Autor.

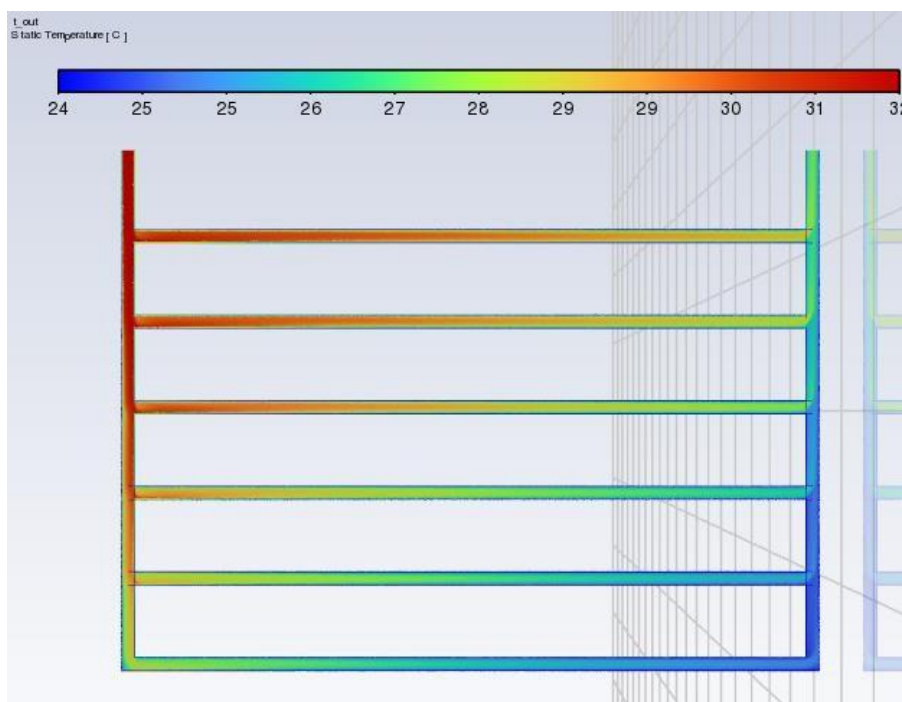


Figura 40. Temperatura del sistema para 60 m de longitud en la configuración 2.
Fuente: Autor.

En las figuras anteriores, al igual que con la configuración 1 se observa que a medida que el aire avanza por la tubería, se produce un intercambio térmico entre el aire y la tubería, evidenciándose una disminución de la temperatura al aumentar la longitud de la tubería.

Para una longitud de 32 m, se logra reducir la temperatura de entrada de $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $27,52\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia de $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el caso de una configuración con 48 m de longitud, se obtiene un mejor resultado, con una diferencia de temperatura de $4,39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente, para una longitud de 60 m se logra que la temperatura de salida del aire sea de $26,78\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se realizaron 2000 iteraciones donde el sistema no converge linealmente hacia 0 lo que causa pequeñas fluctuaciones. En el caso de la ecuación de energía si alcanza la convergencia de forma suave y se mantiene estable. Por otra parte, se puede considerar la influencia del refinamiento del mallado, puede que al realizarse la configuración del mallado se seleccione un mallado más fino al usado en esta simulación, así se podría obtener una convergencia suave y con mayor confiabilidad.

En la figura 41 se muestra una gráfica comparativa entre la temperatura de entrada, temperatura del suelo y la temperatura a la salida del sistema para las tres longitudes simuladas.

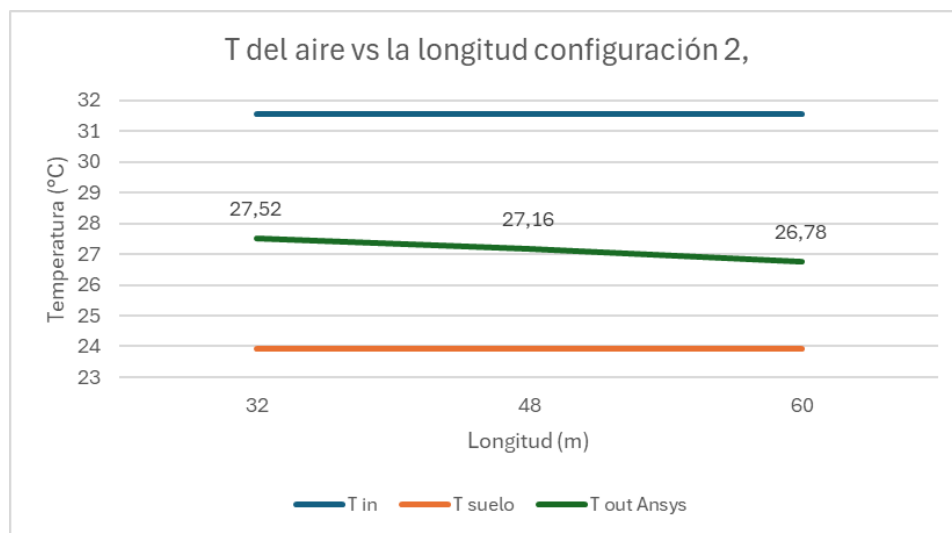


Figura 41. Comparación de las condiciones propuestas con la temperatura de salida del aire para la configuración 2.

Fuente: Autor.

En esta configuración, se observa que los resultados de temperatura disminuyen a medida que aumenta la longitud de la tubería. Sin embargo, ninguna de las longitudes evaluadas alcanza una temperatura cercana a la del suelo.

Para una longitud de 32 m, se obtiene una eficiencia del 53%, con una temperatura de salida del aire de 27,52 °C. Por otra parte, con una longitud de 48 m se logró una eficiencia del 58%. En la simulación evaluada para 60 m, se observa el mejor rendimiento con el aumento de la eficiencia del 5% en comparación con la longitud de 48 m.

En el anexo 6 se muestra la gráfica de residuales para las configuraciones 1 y 2.

8.10. Comparación resultados EES y Ansys Fluent.

De acuerdo con los resultados arrojados por el software de ANSYS fluent, bajo las condiciones especificadas anteriormente y teniendo en cuenta el cálculo teórico relacionando en el capítulo 8.8. Se comparan los resultados teóricos y simulados con el fin de definir los valores de eficiencia y temperatura de salida del aire para su uso en capítulos siguientes.

A continuación, en la figura 42, se muestran los resultados consolidados para el día 22 de febrero para los dos métodos de solución bajo la configuración 1.

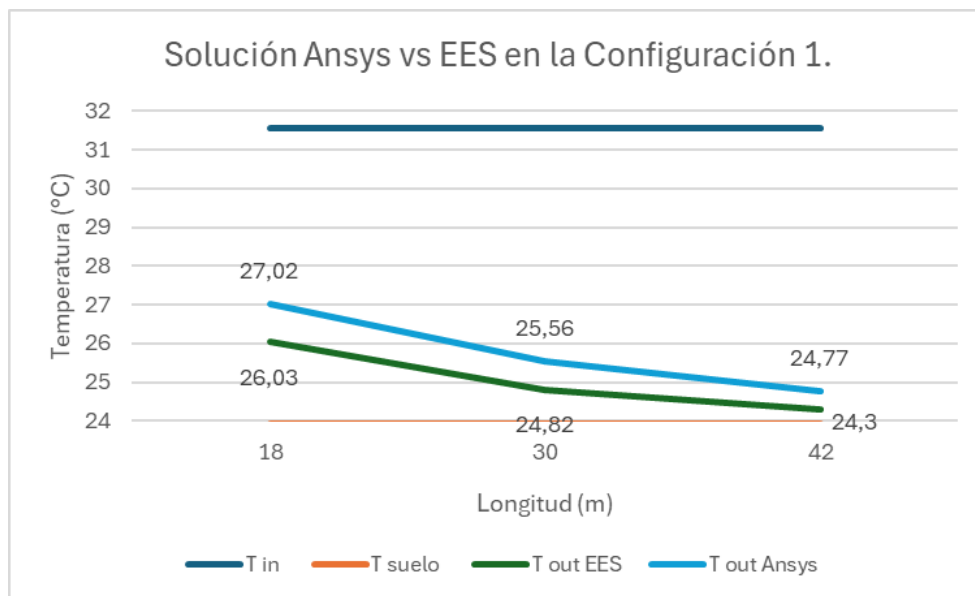


Figura 42. Resultados teóricos y simulados para la configuración 1.
Fuente: Autor.

De acuerdo con la figura 42, para una longitud de 42 m se obtiene el mejor rendimiento donde la solución teórica arroja una temperatura de salida del aire de 24,3 °C con una eficiencia del 95,2%; sin embargo, la simulación muestra una eficiencia del 88,86%, alcanzando una temperatura de salida del aire de 24,77 °C, ambas evaluadas bajo las mismas condiciones. En esta longitud, no se evidencian cambios significativos en la temperatura de salida del aire entre los dos métodos de solución.

Por otro lado, para una longitud de 30 m, la temperatura de salida del aire obtenida de forma teórica es de 24,82 °C, mientras que la solución de la simulación es de 25,56 °C, con una diferencia de 0,74 °C. En el caso de la longitud de 18 m, existe una mayor diferencia entre los resultados teóricos y simulados para la temperatura de salida del aire con un valor de 0,99 °C.

En la figura 43, se muestran los resultados para los dos métodos de solución bajo la configuración 2.

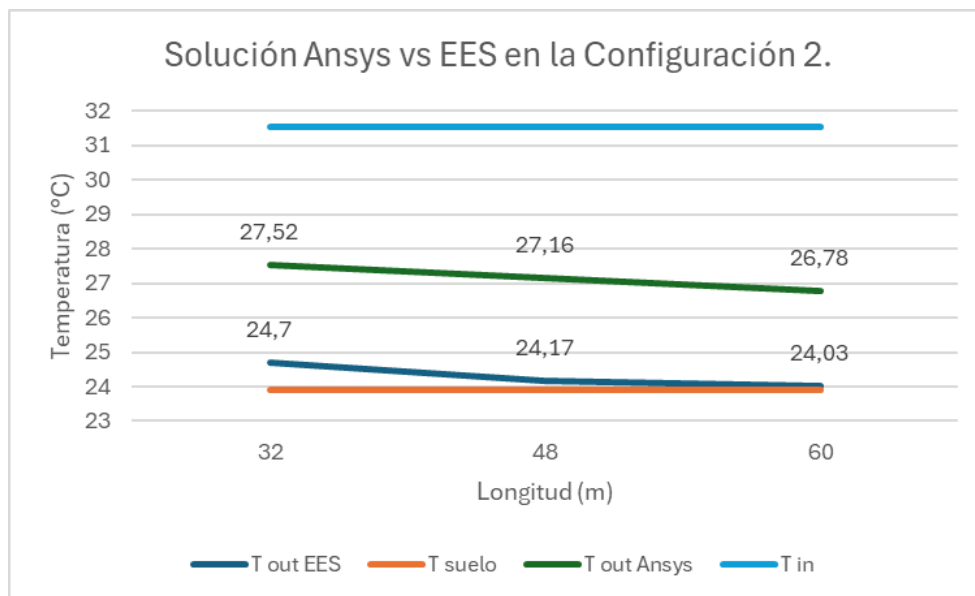


Figura 43. Resultados teóricos y simulados para la configuración 2.
Fuente: Autor.

En la figura anterior se observan los resultados de temperatura de salida del aire, para la longitud de 32 m existe una diferencia de temperatura de 2,82 °C, además discrepa 36,78% en la eficiencia relacionando los dos métodos de solución, un valor significativo ya que las condiciones y parámetros usados fueron los mismos. Se estima que las longitudes que suplen este requerimiento de acuerdo con el cálculo teórico son de 48 m y una eficiencia de 96,72% y 60 m con una eficiencia de 98,56%. En el caso de los resultados del modelado se presenta que, para las longitudes evaluadas, no se alcanza la temperatura del suelo. Aun así, la longitud que tuvo mejor rendimiento entre las evaluadas es la longitud de 60 m y se obtuvo el 63% de eficiencia al reducir la temperatura.

La simulación, al integrar la geometría por su método de solución mediante volúmenes finitos y las condiciones establecidas, ofrece una perspectiva más detallada del comportamiento del sistema en comparación con el cálculo teórico, ya que incluye los efectos geométricos que este último no considera. Esto permite obtener una solución más confiable cuyos resultados son utilizados en análisis posteriores.

8.11. Caída de presión en los modelos.

La caída de presión del fluido en este caso el aire, define la pérdida de presión debido a los efectos de la fricción del fluido con la tubería y cambios de geometría como los accesorios. Es una de las condiciones que se tienen en cuenta para la selección de la disposición que satisface eficientemente los requerimientos para el enfriamiento de la vivienda del estudio.

Se estima la caída de presión total para las dos configuraciones propuestas usando el software de EES, la parametrización de este es mostrado en el anexo 3. En las

dos configuraciones existe un incremento de esta como consecuencia del uso de diferentes accesorios, se usa el método de los coeficientes n para determinar las pérdidas que genera cada accesorio [58], se muestra los resultados en la tabla 22 para la configuración 1.

Tabla 22. Caída de presión en la configuración 1.

Configuración 1			
L (m)	18	30	42
Codos (und)	6	10	14
Tee (und)	0	0	0
Presión dinámica (Pa)	7,815	7,815	7,815
n de codo 90°	1,141	1,141	1,141
n de T	0,7608	0,7608	0,7608
n de entradas	0,78	0,78	0,78
n de salidas	1	1	1
Perdida de presión por accesorios (Pa)	67,42	103,1	138,8
Perdida de presión por rozamiento (Pa)	31,85	53,08	74,32
Perdida de presión total (Pa)	99,27	156,18	213,1

Fuente: Autor.

En la tabla 22, se aprecia que la longitud de 42 m exhibe la mayor caída de presión, debido a sus propias características geométricas; esta caída de presión aumenta 113,83 Pa respecto a la longitud de 18 m, principalmente como resultado de los accesorios, lo que deriva en una pérdida total de presión de 213,1 Pa. En contraste, para la longitud de 18 m se genera una pérdida de presión total de 99,27 Pa y para la longitud de 30 m aumenta 56,91 Pa.

A continuación, en la tabla 23 se muestra la caída de presión para las longitudes evaluadas bajo la configuración 2.

Tabla 23. Caída de presión en la configuración 2.

Configuración 2			
L (m)	32	48	60
Codos (und)	2	2	2
Tee (und)	8	12	12
Presión dinámica (Pa)	7,815	7,815	7,815
n de codo 90°	1,141	1,141	1,141
n de T	0,7608	0,7608	0,7608
n de entradas	0,78	0,78	0,78
n de salidas	1	1	1
Perdida de presión por accesorios (Pa)	79,31	103,1	103,1
Perdida de presión por rozamiento (Pa)	53,08	84,94	106,2
Perdida de presión total (Pa)	132,4	188	209,3

Fuente: Autor.

En la tabla anterior se muestra que para la longitud de 32 m existe una caída de presión total de 132,4 Pa; para la longitud de 48 m se genera una pérdida de presión

total de 188 Pa y para la longitud de 60 m aumenta 21,3 Pa la caída de presión a razón del incremento de la presión por rozamiento relacionando esta diferencia con la longitud de 48 m.

Estas pérdidas de presión afectan negativamente el rendimiento del sistema y aumentan los costos de operación, ya que reducen el caudal del fluido debido a la resistencia generada en cada longitud según su configuración. Para mantener las condiciones del sistema y asegurar un caudal de entrada constante, es necesario implementar sistemas mecánicos, cuya justificación se presenta en secciones posteriores.

8.12. Inversión de material para la implementación del sistema.

Para realizar una selección certera teniendo en cuenta costos de material, eficiencia del sistema y la pérdida de presión generada; se estima la inversión aproximada en relación con los materiales seleccionados en el capítulo 8.7. En la tabla 24 se muestra la comparación entre los costos de material para la configuración 1, de acuerdo con los costos encontrados en almacenes locales.

Tabla 24. Costo de material para las longitudes evaluadas en la configuración 1.

Variables	Configuración 1		
Longitud (m)	18	30	42
Tubos (Und)	3	5	7
Codos (Und)	6	10	14
Tee (Und)	0	0	0
Costo tee (COP\$)	\$ 104.450	\$ 104.450	\$ 104.450
Costo codos (COP\$)	\$ 98.900	\$ 98.900	\$ 98.900
Costo tubos (COP\$)	\$ 207.000	\$ 207.000	\$ 207.000
Costo por geometría	\$1.214.400	\$2.024.000	\$2.833.600

Fuente: Autor, [59], [60].

De acuerdo con la tabla 24, se evidencia que existe una diferencia en la inversión de \$809.600 entre la longitud de 18 y 30 m donde la implementación de 2 tubos adicionales y accesorios aumentaría 19,14% de eficiencia ocasionando un incremento significativo. Para el caso de la longitud de 30 a 42 m la eficiencia se amplifica 10,35% de acuerdo con los resultados simulados, lo que corresponde el aumento de 2 tubos y la misma cantidad de accesorios que en el caso anterior.

En la tabla 25 a continuación se muestra la comparación entre los costos de material para las longitudes evaluadas de la configuración 2.

Tabla 25. Costo de material para las longitudes evaluadas en la configuración 2.

Variables	Configuración 2		
Longitud (m)	32	48	60
Tubos (Und)	5	8	10
Codos (Und)	2	2	2
Tee (Und)	8	12	12
Costo tee (COP\$)	\$104.450	\$104.450	\$104.450
Costo codos (COP\$)	\$ 98.900	\$ 98.900	\$ 98.900
Costo tubos (COP\$)	\$207.000	\$207.000	\$207.000
Costo por geometría	\$1.232.800	\$3.107.200	\$3.521.200

Fuente: Autor, [59], [60].

De acuerdo con la tabla anterior, la diferencia en los costos de material para longitudes de 32 y 48 metros es de \$1.874.400, lo cual es un valor significativo que resulta en un aumento entre el 4,72% en la eficiencia. En el caso de las longitudes de 48 a 60 metros, la diferencia en costos es de \$414.000, lo que conlleva a un incremento de 4,98% en la eficiencia.

8.13. Selección de la geometría.

En relación con los apartados anteriores, se determinó que la simulación, al considerar la geometría y las condiciones propuestas, ofrece una mejor perspectiva del comportamiento del sistema en comparación con el cálculo teórico ya que tiene en cuenta los efectos geométricos a diferencia del cálculo teórico generando una solución con mayor confiabilidad. Por esta razón, se utilizaron los resultados de eficiencia obtenidos a través de la solución CFD para identificar la configuración que proporciona el mejor rendimiento justificándose bajo las pérdidas de presión y los costos asociados, destacando su impacto en el rendimiento de las distintas configuraciones.

En la configuración 1, el mejor rendimiento se obtiene con una mayor longitud aun así la disminución de la temperatura entre la longitud de 30 y 42 m no es significativa para aumentar la cantidad de tubería que requiere esta última, lo que genera la adición de \$809.600 por el incremento del 10,35%. Por otra parte, la longitud de 18 m que es la que menor eficiencia obtiene con un valor de 59,37% el cual aumenta 19,14% al adicionar tubería y accesorios en el sistema lo cual se justifica por el mismo valor de \$809.600.

En el caso de la pérdida de presión, al aumentar la cantidad de accesorios y la longitud el incremento de la pérdida de presión se verá perjudicado. La pérdida de presión que se genera para la longitud de 18 m es de 99,27 Pa. Para la longitud que

tiene mayor eficiencia de 42 m provoca una pérdida de presión de 213,1 Pa y en comparación con la de 30 m se genera una diferencia de 56,92 Pa.

Teniendo en cuenta lo anterior, la menor longitud, aunque genere menores pérdidas de presión no obtiene la mejor eficiencia, en el caso de los 30 m con una pérdida de presión total de 156,18 Pa obtiene una eficiencia de 78,51% justificando el aumento del material requerido con un costo aproximado del material de \$2.024.000; en comparación con la longitud de 42 m donde para aumentar la eficiencia 10,35% se requiere una inversión adicional de \$809.600, lo cual no se justifica para su selección en esta configuración.

En la configuración 2, como se observó en la figura 43, el mejor rendimiento se obtiene con una longitud de 60 metros, generando una eficiencia del 63%, una pérdida de presión de 209,3 Pa y una inversión aproximada de \$3.521.200. Sin embargo, al comparar con la configuración 1, se selecciona el modelo con una longitud de 30 m ya que ofrece mejores resultados: una pérdida de presión de 156,18 Pa, una eficiencia del 78,51% y una inversión aproximada de \$2.024.000.

8.14. Componentes del sistema.

Una de las justificaciones de este proyecto representa la inocuidad y la mejora del confort térmico que otros sistemas de enfriamiento no satisfacen, en este caso la renovación de aire es un aspecto importante como ya se abordó anteriormente. Donde se determinaron las renovaciones de aire ideales para la vivienda en estudio, basado en la norma DIN 1946 para el espacio a enfriar se requieren 7 renovaciones por hora, y para lograr estas renovaciones se necesita suministrar 252 m³/h de aire en el recinto; para efectos de cálculo se usó el caudal recomendado según la ASHRAE y es de 288 m³/h.

Dentro de los componentes del sistema se incluye 30 metros de tubería de PVC de 6", en el montaje se debe incluir un drenaje esto como consecuencia del cambio de temperatura y la generación de condensaciones dentro de la tubería o posibles infiltraciones de agua desde el terreno, en el área de succión del aire se incluyen un filtro grueso o fino minimizando el paso de partículas que puedan alterar el funcionamiento e inocuidad del sistema garantizando la calidad del aire y reducción de la aparición de malos olores [26]

Adicionalmente se debe incluir un elemento mecánico como el ventilador el cual puede desplazar y mantener los requerimientos del caudal que ingresa al recinto, además favorece las condiciones internas del aire, propagando un aire de óptima calidad, eliminando posibles agentes contaminantes.

Los sistemas de ventilación se clasifican en equipos de impulsión mecánica o de empuje natural; en el caso de los equipos de impulsión se implementan dispositivos como un ventilador y en el caso del empuje natural se trata de equipos pasivos, es

decir que no usan ningún mecanismo que requiera de energía para su funcionamiento, aquí se pueden implementar las chimeneas solares [21]. En la figura 44 se muestra la ubicación y el tipo de sistema de impulsión del aire que se usan en los ICTA.

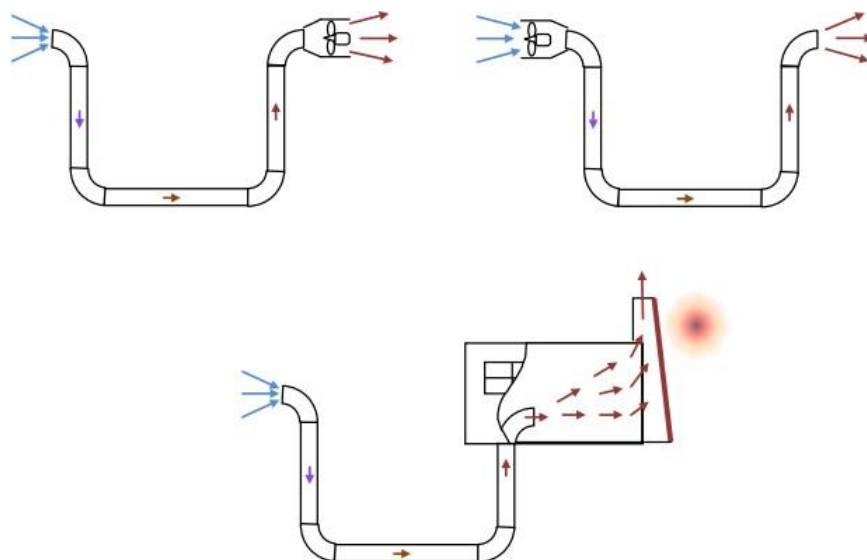


Figura 44. Sistema de impulsión mecánica y pasiva.
Fuente: [21].

Para el desarrollo adecuado del sistema de intercambio de calor y asegurar el caudal a suministrar, existen diferentes tipos de ventiladores los cuales se clasifican por el tipo de flujo que tiene el aire, entre estos se encuentran los axiales, centrífugos y tangenciales, se selecciona el tipo de ventilador que sus características se adecúen con los requerimientos del sistema. En la tabla 26, se muestran las características de este tipo de ventiladores.

Tabla 26. Características de los ventiladores industriales.

Axiales	Centrífugos	Tangenciales
Trayectoria del flujo paralelo al eje.	Trayectoria del flujo perpendicular al eje.	Trayectoria del flujo paralelo al eje.
Tamaño según requerimiento.	Gran tamaño.	Tamaño pequeño o mediano.
Grandes volúmenes de aire.	Bajos volúmenes de aire.	Moderado y alto volumen de aire.
Trabajo a baja presión.	Trabajo a alta presión.	Trabajo a presiones bajas
Fácil instalación.	Construcción maciza.	Fácil instalación.
Trabajo en temperaturas moderadas a bajas.	Trabajo en altas temperaturas.	Trabajo en altas temperaturas.
Más económicos.	Menos económicos.	Menos económicos.
Aplicaciones en edificios públicos, locales comerciales, hotelería, hospitales, acondicionamiento de aire y extracción de aire.	Aplicaciones en equipos fancoil, cortinas de aire y climatización.	Sistemas de extracción de aire, de dispositivos electrónicos, enfriamiento de motores.

Fuente: Adaptado de [61]

De acuerdo con la tabla anterior, relacionando las aplicaciones de cada tipo de ventilador, los tres funcionan adecuadamente, en el caso de los axiales tienen un menor costo de adquisición y una fácil instalación además de que trabajan para temperaturas moderadas a baja presión y grandes volúmenes de aire.

Por otra parte, para asegurar una correcta renovación de aire, existen diversas opciones de instalación. En la actualidad, los sistemas más eficientes son los de doble flujo, los cuales requieren tanto un aporte como una extracción forzada de aire. Asimismo, otra alternativa viable es la implementación de un sistema híbrido de renovación de aire, donde la circulación y renovación se llevan a cabo mediante ventilación mecánica y natural. En la figura 45 se ilustran algunas formas eficientes de renovación de aire [62]

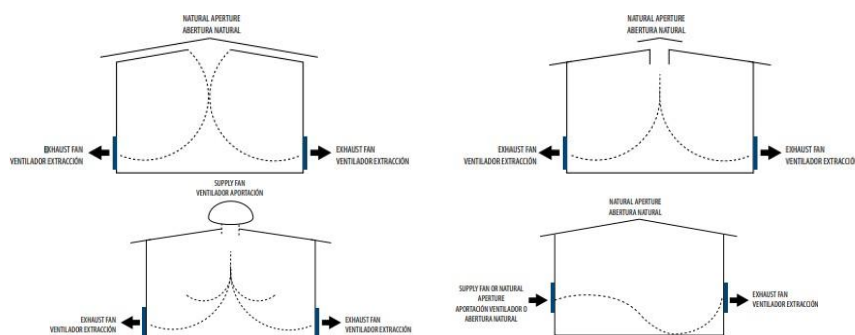


Figura 45. Formas de instalación para una renovación de aire apropiada.

Fuente: [62].

8.14.1. Selección del ventilador.

Con el fin de determinar el ventilador adecuado para el sistema, se tienen en cuenta los catálogos de los fabricantes de ventiladores Sodeca y S&P; en la búsqueda en los catálogos se extrajeron los ventiladores que podían satisfacer los requerimientos del sistema para un caudal de $288 \text{ m}^3/\text{h}$ y una presión de 156 Pa ; son mostrados en la tabla 27. En el anexo 7 se muestra la descripción del catálogo.

Tabla 27. Ventiladores seleccionado.

Ventiladores	
Sodeca	S&P
Sve/plus - 125/L	TD-500/150 3V
Sve/plus - 125/H	
Neosilent	
Neolineo	

Fuente: Autor.

En la tabla 28, se muestran los valores de presión obtenidos de las curvas características de los ventiladores seleccionados para el caudal requerido. En el anexo 8 se muestran las curvas de operación de los ventiladores seleccionados.

Tabla 28. Comparación de ventiladores para el sistema

Requerimiento		Ventilador		
		Sve/plus		
Q (m³/h)	P (Pa)	Pe - 125/L (Pa)	Pe -125/H (Pa)	
288	156,2	55	224	
		Neosilent		
		Pe Min (Pa)	Pe Max (Pa)	
		0	37,2	
		Neolineo		
		Pe Min (Pa)	Pe Max (Pa)	
		80,52	147,4	
		TD-500/150 3V		
		Pe a VL (Pa)	Pe a VM (Pa)	Pe a VR (Pa)
		50	114,8	176

Fuente: Elaborado a partir de [63], [64]

De acuerdo con la tabla 28, se observa que el ventilador Sve/plus modelo 125/L el punto de operación se encuentra por debajo del requerido; por el contrario, el 125/H tiene un punto de operación por encima del requerido, con una velocidad de 2808 RPM y una potencia máxima de 180 W, donde la presión es de 224 Pa y tiene un costo de 1'882.000 COP.

En el caso de los ventiladores Neosilent y Neolineo, el punto de operación se sitúa por debajo del nivel necesario tanto para su rendimiento mínimo y máximo. En consecuencia, estos ventiladores no satisfacen las necesidades requeridas para la vivienda, resultando insuficiente.

Para el ventilador TD-500/150 3V, en el caso de la velocidad lenta (VL) de 1820 RPM y la velocidad media (VM) de 2150 RPM no suplen los requerimientos de operación, para la velocidad rápida (VR) con 2590 RPM el punto de operación se establece con una presión de 176 Pa y una potencia máxima de 53 W por un valor superior al requerido garantizando que a esta velocidad la resistencia al flujo de aire es superada y tiene un costo de \$1'087.000 COP.

Para respaldar las condiciones, se puede incluir en el sistema un variador de velocidad con el fin de permitir el control preciso del caudal de aire, ajustando la velocidad del ventilador y que así cumpla con los requerimientos; aunque este genera un costo adicional elevado, teniendo en cuenta que su aplicación es para una vivienda unifamiliar.

Teniendo en cuenta que los dos ventiladores que satisfacen los requerimientos son el Sve/plus 125/H y el TD-500/150 3V, se selecciona el de menor valor el cual es el

modelo TD-500/150-3V de la línea TD MIXVENT de S&P con un costo de \$1'087.000 COP, este ventilador cuenta con una potencia absorbida máxima de 53 W y una intensidad absorbida máxima de 0,21 A.

8.15. Selección sistema de enfriamiento.

El uso de sistemas de enfriamiento es ampliamente común en Colombia y en todo el mundo. Uno de los dispositivos más utilizados para este fin es el aire acondicionado, el cual se encarga de reducir la temperatura ambiente y ofrece aire de calidad desde que este se encuentre bien instalado, se realice el uso adecuado y con el correcto mantenimiento.

Cuando se hace uso inadecuado del sistema como al disminuir la temperatura del equipo, el aire helado reseca el ambiente disminuyendo la humedad lo cual genera que en los usuarios las mucosas de las vías aéreas superiores se vean afectadas, debilitando su respuesta defensiva en el organismo de las personas. Además, la falta de mantenimiento o un mantenimiento inadecuado de los equipos puede propiciar la proliferación de microorganismos como moho, levaduras y hongos responsables de infecciones [65]

Se selecciona un aire acondicionado para uso residencial, este tipo Split para los cuartos y sala-comedor; de acuerdo con lo anterior, en la tabla 29 se muestra la capacidad de refrigeración de los equipos de aire acondicionado que normalmente se clasifican de los 9.000 BTU a los 24.000 BTU teniendo en cuenta la guía de selección proporcionada por Samsung como se muestra a continuación [14].

Tabla 29. Capacidad de refrigeración por área según el fabricante Samsung.

Área aproximada	Capacidad recomendada	Generalmente usados en:
Hasta 15 metros cuadrados	9,000 BTU	Cuartos y habitaciones pequeñas.
Hasta 20 metros cuadrados	12,000 BTU	Cuartos y habitaciones de mayor tamaño.
Hasta 30 metros cuadrados	18,000 BTU	Salas, comedores, oficinas y cuartos de mayor tamaño.
Hasta 40 metros cuadrados	24,000 BTU	Salas, comedores, oficinas y cuartos de gran tamaño.

Fuente: [14].

Teniendo en cuenta la tabla 4, se determina la capacidad de enfriamiento de acuerdo con el área de los cuartos y la estancia sala-comedor ya que estos son los

que mayor uso tienen en una vivienda; para los primeros se define una capacidad de 12.000 BTU y para la sala-comedor se establece de 18.000 BTU.

Se selecciona el Aire acondicionado SAMSUNG 12.000 Btu Tipo Split inverter WindFree220V Blanco AR12CVFCMWK/CB para los dos cuartos, este tiene un costo de \$1.975.900 cada uno con eficiencia energética tipo C y un aire acondicionado CHALLENGER 18.000 Btu Tipo Split Inverter 220V Blanco para la sala-comedor, tiene una eficiencia energética tipo C y un costo de \$2.259.000 [66], [67].

8.16. Consumo energético.

Con el fin de definir el consumo energético para cada sistema, se especifica el costo del kWh en la ciudad de Villavicencio y se usa la herramienta de superservicios SUI sistema único de información para determinar este valor, en Villavicencio la empresa proveedora de energía es la electrificadora del meta S.A. donde el valor facturado por consumo en el último mes del año 2023 fue de 703.3 \$/kWh [15], a partir de esto se define el costo del consumo que genera el aire acondicionado y el ventilador seleccionado.

En la tabla 30 se muestra el consumo de los equipos de aire acondicionado seleccionados anteriormente. El consumo de energía del ventilador seleccionado se muestra en la tabla 31.

Tabla 30. Consumo de energía del aire acondicionado.

Equipo	Split Inverter 12000 BTU	Split Inverter 18000 BTU	Total
Cantidad	2	1	3
Inversión	\$3.951.800	\$2.259.900	\$6.211.700
Potencia (kW)	1,03	1,55	2,58
Tiempo operativo (h)	5	5	5
Consumo (kW/h)	10,3	7,8	18,07
Costo del kW/h en \$COP	\$703	\$703	\$703
Costo mensual \$COP	\$ 217.706,3	\$163.447,5	\$381.154

Fuente: Autor.

De acuerdo con la tabla 30, se realiza la inversión de \$6'211.700 COP en aire acondicionado los cuales están dispuestos en las estancias antes mencionadas generando un consumo mensual de \$381.154 COP. La información respecto al consumo está apreciada en la ficha técnica de cada equipo, el cual fue utilizado también para realizar la estimación de consumo en este documento.

Tabla 31. Consumo de energía del ventilador seleccionado.

Ventilador TD-500/150-3V	
Consumo max (W)	53
Tiempo operativo (h)	5
Consumo diario (kWh)	0,265
Costo del kWh en \$COP	\$703
Costo diario \$COP	\$186
Costo mensual \$COP	\$5.591

Fuente: Autor.

El ventilador tiene un consumo máximo de 53 W y evaluando su consumo energético bajo las mismas condiciones operativas del aire acondicionado como lo recomienda el fabricante, se obtiene un consumo mensual de \$5.591, demostrando ser menor en comparación con el del aire acondicionado.

Implementando el sistema ICTA, el consumo energético anual se reduciría de 6,506 kWh a 95,4 kWh anuales, lo que representaría un ahorro de \$4'506.751, pasando a un costo energético de \$67.095. Sin embargo, aunque los sistemas convencionales generan un mayor consumo energético, también tienen la capacidad adicional de mejorar las condiciones del aire en el interior de la vivienda, controlando la humedad y la calidad del aire. En contraste, el sistema ICTA se enfoca únicamente en disminuir la temperatura, sin intervenir en otros parámetros dentro del recinto.

Se determinó que el coeficiente de rendimiento COP_R del intercambiador de calor, teniendo en cuenta la temperatura de salida del aire para las dimensiones seleccionadas es de 3,8. La mayoría de los acondicionadores de aire tienen un COP en un rango de 3,8 a 6,2 estableciendo que el sistema ICTA se encuentra dentro de este [22]

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. Conclusiones.

El modelo matemático usado para determinar la temperatura del suelo a diferentes profundidades, puso en evidencia que a una mayor profundidad se encuentra una temperatura constante con una variación mínima; se encontró que la temperatura promedio a diferentes profundidades tiende a ser constante con la temperatura promedio en Villavicencio con un valor de 25,8 °C y una variación de la temperatura en la superficie de 14 °C; la profundidad que presenta menor variación en la temperatura del suelo es a 30 m con un valor de 0,28 °C, seguido de una profundidad de 10 m donde la temperatura del suelo varía por 3,76 °C.

De acuerdo con la temperatura exterior y del suelo seleccionadas para el estudio se concluye que, según las dimensiones, el sistema tendría la capacidad para disminuir la temperatura hasta 6 °C aproximadamente, donde genera el correcto rendimiento para temperaturas mayores a la temperatura promedio del sitio gracias al mayor diferencial de temperatura.

Se garantiza la entrada del caudal de aire en la vivienda al determinar el diámetro de la tubería de 6" y la velocidad del aire de 4,4 m/s, cumpliendo con los requisitos de caudal y ubicándose dentro de un rango de baja velocidad para sistemas de ventilación.

La selección de PVC para los conductos enterrados no fue un factor limitante para alcanzar la temperatura del suelo, a pesar de su baja conductividad térmica de 0,17 W/mK. El PVC es más económico en comparación con materiales de mayor conductividad térmica, como el acero inoxidable, que tiene una conductividad de 14,2 W/mK y un costo de \$980,000 por tubo de 6 m. Sin embargo, optar por acero inoxidable representaría una inversión adicional de \$773,000 por tubo. Por lo tanto, el acero inoxidable podría ofrecer mejores propiedades térmicas si el factor económico no fuera un limitante.

Se demostró que al aumentar la longitud del sistema existe un mayor intercambio térmico; la temperatura de salida del aire tiende a ser constante y se aproxima a la temperatura del suelo como se mostró en las figuras 42 y 43, implicando que la temperatura mínima de salida del aire sea aproximada a 25,8 °C y su variación según la profundidad definida, en este caso de 3,76 °C. Además, los resultados en ANSYS tienden a ser más confiables debido a la dependencia de la geometría, en comparación con los resultados teóricos los cuales son más optimistas debido a su aplicabilidad principalmente a condiciones lineales.

Teniendo en cuenta la evidencia de la figura 40, se concluye que para la configuración 2 tipo techelmann en U, ninguna de las tres longitudes evaluadas se acerca a la temperatura del suelo. En esta configuración la longitud de 60 m obtuvo la mejor eficiencia térmica con un valor de 63%, una temperatura de 26,78°C y una pérdida de presión de 209,3 Pa, estos resultados como consecuencia de la ubicación de la salida del aire que se ve alterada por el aire que ingresa al sistema y que se expande entre los tramos de la propia geometría siendo cedida nuevamente al aire que se ubica en la salida del sistema.

El análisis de la configuración 1 tipo serpentín, basado en los resultados simulados, muestra que seleccionar una longitud de 30 m tiene un rendimiento adecuado en comparación con la longitud de 42 m donde no se justifica su selección, debido al incremento del costo del material por un valor de \$809,600 y la caída de presión de 56.92 Pa para mejorar la eficiencia del sistema solo 10,35%. La diferencia de la temperatura entre la entrada del aire y salida de este es de 6 °C ya que su geometría

sigue un trayecto específico y la salida del aire se encuentra diagonal a la entrada, evitando que el aire que ingresa al sistema interfiera con la temperatura de salida.

Se concluye que el sistema ICTA tiene un menor consumo energético donde el ventilador seleccionado generaría un consumo de 95,4 kWh anuales con un costo de \$67.095 logrando un ahorro en relación con el aire acondicionado seleccionado de \$4'506.751. Considerando que el ICTA solo proporciona enfriamiento, un sistema de aire acondicionado resulta ser una opción superior, ya que además de enfriar, controla la humedad y filtra el aire, ofreciendo un mayor confort y mejorando la calidad del ambiente interior.

En cuanto a la inversión total de cada sistema, el ICTA es un sistema que representa estudios especializados y trabajos de infraestructura adicional para la vivienda, por lo que su precio sería considerablemente más elevado a un sistema convencional de aire acondicionado. El análisis económico de implementar dicho sistema no fue abordado en este trabajo.

9.2. Trabajos futuros.

Recolectar datos de temperatura en donde realizará el estudio proporcionaría resultados con mayor confiabilidad. Por otra parte, también se estima que, al realizar un estudio de suelos, se pueden mitigar ciertas suposiciones lo cual generaría mejores resultados.

Comparar el sistema con la disposición Techelman tipo U con el tipo Z y posteriormente, con la disposición en serpentín seleccionado en este estudio. Esto permitirá determinar si el cambio en la salida del aire mejora el rendimiento del sistema y si representa una mejor opción frente a la seleccionada.

Un análisis económico detallado de la implementación de estos sistemas es esencial para respaldar la toma de decisiones. Este estudio proporcionaría información sobre los costos involucrados, los beneficios esperados y el retorno de la inversión. Además, servirá como base para identificar áreas de mejora y optimización permitiendo así ajustes que conduzcan a un funcionamiento más eficiente y rentable a largo plazo.

De acuerdo con el análisis económico se decidiría llevar a cabo o no, la instalación del diseño propuesto del sistema ICTA, con el objetivo de mejorar, supervisar, optimizar y comparar las condiciones y resultados obtenidos en el sistema de manera experimental, lo cual permitiría alcanzar una mayor eficiencia en el enfriamiento.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Generacion-electrica-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC_01-12-2020”.
- [2] unep.org, “La inversión en energía renovable alcanzó US\$ 288.900 millones en 2018 y superó con creces al sector de combustibles fósiles”, jun. 2019. Consultado: el 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/la-inversion-en-energia-renovable-alcanzo-us-288900>
- [3] A. Yepez, L. Perez, F. Carvajal, M. Hallack, y V. Snyder, “Cinco cosas que debes saber sobre el sector energía en América Latina y el Caribe”. Consultado: el 16 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/energia/es/cinco-cosas-que-debes-saber-sobre-energia-en-america-latina-y-el-caribe/#:~:text=El%2058%25%20de%20la%20generaci%C3%B3n,biomasas%2C%20y%201%25%20geot%C3%A9rmica.>
- [4] Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, “acolgen”. Consultado: el 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acolgen.org.co/>
- [5] Asociación geotérmica Colombiana, “Declaración-de-Bogota_RENAG2018”, BogotáD.C, dic. 2018. Consultado: el 23 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ageocol.org/wp-content/uploads/2019/10/Declaraci%C3%B3n-de-Bogota_RENAG2018.pdf
- [6] UNAL, “Energía geotérmica: ¿qué es y cuáles son sus beneficios?”. Consultado: el 7 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/energia-geotermica-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios/#:~:text=Esta%20es%20una%20energ%C3%ADa%20limpia,generan%20gases%20de%20efecto%20invernadero.>
- [7] Iberdrola, “Arquitectura bioclimática, las construcciones que respetan el medio ambiente”. Consultado: el 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-arquitectura-bioclimatica>
- [8] A. Argemi, “7 razones para no usar el aire acondicionado”, ElPaís. Consultado: el 6 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://elpais.com/elpais/2013/06/13/alterconsumismo/1371111925_137111.html
- [9] J. ARIAS, “Perfil técnico ambiental para el sistema de aire acondicionado en ingeniería especializada S.A.-IEB”, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2016. Consultado: el 1 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/2909>
- [10] Unidad de Planeación Minero Energética y Corpoema, “Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética Resumen Ejecutivo BEU Sector Residencial y Terciario”, Bogotá y Karlsruhe, abr. 2019. Consultado: el 6 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en:

- https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf
- [11] “El clima y el tiempo promedio en todo el año en Villavicencio”, weatherspark. Consultado: el 5 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/24273/Clima-promedio-en-Villavicencio-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [12] L. Trujillo *et al.*, “Pobreza monetaria”, sep. 2023. Consultado: el 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/pres-PM-2022.pdf>
- [13] DANE, “En 2022 el 36,6% de la población del país se encontraba en condición de pobreza, el 30,7% en situación de vulnerabilidad, el 29,9% pertenecía a la clase media y el 2,8% se ubicó en la clase alta”, Bogotá, nov. 2023. Consultado: el 7 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/cp-PMClaseSociales-2022.pdf>
- [14] Samsung, “¿Como elegir la capacidad de mi aire acondicionado?”, Samsung. Consultado: el 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.samsung.com/latin/support/home-appliances/how-to-choose-the-capacity-of-my-air-conditioner/>
- [15] SUI, “Indicadores sobre el servicio, reportes comerciales, financieros, administrativos y técnico operativos, acceso a la bodega de datos y cadena de prestación del servicio de energía.”, SUIsuperservicios. Consultado: el 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energ%C3%ADa>
- [16] “Aire Acondicionado Minisplit Inverter 9000 BTU 220 V Blanco”, Homecenter. Consultado: el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://homecenter.falabella.com.co/homecenter-co/product/118651438/Aire-Acondicionado-Minisplit-Inverter-9000-BTU-220-V-Blanco/118651440?exp=homecenter>
- [17] Naciones unidas, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible”, un.org. Consultado: el 1 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [18] ONU, “Los aires acondicionados exacerban la crisis climática. ¿Cómo la naturaleza puede ayudar”, jun. 2023. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/los-aires-acondicionados-exacerban-la-tesis-climatica-como-la>
- [19] A. M. Cabezas, “EFICIENCIA ENERGÉTICA A TRAVÉS DE UTILIZACIÓN DE POZOS CANADIENSES CON EL ANÁLISIS DE DATOS DE UN CASO REAL ‘CASA POMARET’”, Universidad Politécnica de Catalunya – UPC, Barcelona, 2012. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21068>
- [20] A. Isabel Edo Escudero Tutor Belén Zalba Nonay, “Estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire. Implementación de un software de

- prediseño.”, Universidad zaragoza, 2021. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/106869#>
- [21] C. Arias, “Potencial de los intercambiadores de calor tierra-aire para acondicionamiento de aire en diferentes zonas climáticas”, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2015. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/26727>
- [22] Y. A. Çengel y M. A. Boles, *TERMODINAMICA*, 6a ed. Mexico, 2009.
- [23] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones*, 3a ed. Mexico, 2011.
- [24] O. Ozgener, L. Ozgener, y J. W. Tester, “A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications”, *Int J Heat Mass Transf*, vol. 62, pp. 473–480, jul. 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031.
- [25] Maoz *et al.*, “Parametric optimization of Earth to Air Heat Exchanger using Response Surface Method”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, núm. 11, jun. 2019, doi: 10.3390/su11113186.
- [26] S. Martín Díaz, “El terreno como intercambiador Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta”, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, 2018. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/49966/>
- [27] W. Gómez D. y J. D. Pérez F., ““ESTUDIO NUMÉRICO – EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN POR CONDUCTOS ENTERRADOS””, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2009. Consultado: el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/handle/10872/6743>
- [28] NASA, “Navier-Stokes Equations”, NASA. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>
- [29] S. Flores Larsen y G. Lesino, “INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE: USO DEL SUELO PARA ENFRIAMIENTO PASIVO”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, pp. 59–64, 2000, Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79076>
- [30] Observatorio nacional de logística - Departamento nacional de planeación, “Avanzando hacia un Futuro Energético Sostenible en Colombia”, onl.dnp.gov. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://onl.dnp.gov.co/Paginas/Avanzando-hacia-un-Futuro-Energetico-Sostenible-en-Colombia.aspx>
- [31] O. Paredes Zapata *et al.*, “Geotermia en Colombia”, Bogotá, D.C, 2019. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>
- [32] D. Alcantar, “Dimensionamiento de un intercambiador de calor geotérmico vertical para aplicaciones en bombas de calor”, Universidad Michoacana de San Nicolas De Hidalgo, Morelia, 2016. Consultado: el 28 de octubre de 2024.

-
- [En línea]. Disponible en: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5531/1/FIM-M-2016-1145.pdf
- [33] C. D. Aguirre y R. B. Ordoñez, “ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA CLIMATIZACIÓN DE AMBIENTES MEDIANTE LA TÉCNICA DE POZO CANADIENSE”, UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ, Loreto, 2019. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/819>
- [34] J. Escuer, “INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE EN LA CLIMATIZACIÓN DE CONSTRUCCIONES. POZOS PROVENZALES Y TÉCNICAS EMPARENTADAS”, nov. 2008. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.geoconsultores.org/ficheros/b16cc7769427df3836167c798745d9cc.pdf>
- [35] J. Escuer, “INTERCAMBIADORES TIERRA-AIRE EN LA CLIMATIZACIÓN DE CONSTRUCCIONES”, 2010. [En línea]. Disponible en: www.geoconsultores.com
- [36] PAVCO Wavin, “Manuales técnicos”, pavcowavin.com.co. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/manuales-tecnicos>
- [37] ecopetrol, “Alianza entre Ecopetrol, Baker Hughes y CHEC para impulsar la energía geotérmica en Colombia”, ecopetrol. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/alianza-entre-ecopetrol-baker-hughes-y-chec-para-impulsar-la-energia-geotermica-en-colombia#:~:text=La%20Geotermia%20es%20una%20de,convocar%20el%20inter%C3%A9s%20y%20el>
- [38] J. Lopez y R. Serra, “El Movimiento del Aire Condicionante de Diseño Arquitectónico”, Escuela técnica superior de arquitectura de Barcelona, Barcelona, 2006. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: www.fomento.es
- [39] M. Ferrucci y F. Peron, “Ancient Use of Natural Geothermal Resources: Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings”, *Sustainability*, vol. 10, núm. 12, p. 4340, nov. 2018, doi: 10.3390/su10124340.
- [40] M. Him, A. Humphries, P. Fuentes, y M. Chen, “Evaluación del potencial geotérmico inverso y solar para reducir el consumo energético de una instalación hospitalaria en Panamá”, *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, vol. 5, núm. 1, pp. 83–99, ene. 2022, doi: 10.37135/ns.01.09.06.
- [41] H. Paola, K. María, y E. Melo, “Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-humedo”, *Revista del Desarrollo Tecnológico*, vol. 1, núm. 2, pp. 44–51, jun. 2017, Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea].

-
- Disponible en:
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Desarrollo_Tecnologico/vol1num2/Revista_del_Desarrollo_Tecnologico_V1_N2_5.pdf
- [42] A. Pakari y S. Ghani, "Numerical evaluation of the thermal performance of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: A parametric study", *International Journal of Refrigeration*, vol. 125, pp. 25–33, may 2021, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.12.034.
- [43] Ł. Amanowicz, "Influence of geometrical parameters on the flow characteristics of multi-pipe earth-to-air heat exchangers – experimental and CFD investigations", *Appl Energy*, vol. 226, pp. 849–861, sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.096.
- [44] C. Baglivo, D. D'Agostino, y P. M. Congedo, "Design of a Ventilation System Coupled with a Horizontal Air-Ground Heat Exchanger (HAGHE) for a Residential Building in a Warm Climate", *Energies (Basel)*, vol. 11, núm. 8, p. 2122, ago. 2018, doi: 10.3390/en11082122.
- [45] V. Bansal, R. Misra, G. Das Agrawal, y J. Mathur, "Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling", *Energy Build*, vol. 42, núm. 5, pp. 645–648, may 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.11.001.
- [46] Á. David Valenzuela Ramírez y U. Antonio Nariño, "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", Universidad Antonio Nariño, Neiva, 2022. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uan.edu.co/items/cb1cbcbe-1d18-4699-9925-b5251284b856>
- [47] F. Barreto Jarava, "Diseño de estudio técnico-económico para proyecto de climatización por medio de pozo canadiense utilizando energía geotérmica. Caso empresa 'Transportes Santo Domingo'", Universidad de la Salle, Bogotá, 2022. Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/2814e0e9-bb91-4bc9-b8c8-2801324ced6b/full>
- [48] ASHRAE, *ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS*. 2021.
- [49] google, "Google maps". Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com.co/maps/place/4%C2%B007'12.5%22N+73%C2%B036'27.4%22W/@4.1200496,-73.608359,207m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d4.120138!4d-73.60762?entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MTAyNy4wLWIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- [50] Civilingenieriasas, "ESTUDIO DE SUELOS CONSTRUCCION DE DOS TANQUES ELEVADOS Y UNO SEMIENTERRADO EN LA URBANIZACION RINCON DE LAS MARGARITAS", Villavicencio, nov. 2018.
- [51] IDEAM, "Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos". Consultado: el 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

-
- [52] Macrofilter, “¿CÓMO CIRCULA EL AIRE EN UN DUCTO DE VENTILACIÓN?” Consultado: el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://filtrosindustrialesmacrofilter.com/como-circula-el-aire-en-un-ducto-de-ventilacion/>
- [53] Homecenter, “Tubo Sanitario 6' X 6 Mts.” Consultado: el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65855/tubo-sanitario-6-x-6-mts/65855/>
- [54] granadaycia, “TUBO ACERO INOXIDABLE 304 SIN CONSTURA CALIBRE 40 A312 PE 6" HOPE”. Consultado: el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://granadaycia.com/calibre-40-sch-40-158/tubo-acero-inoxidable-304-sin-constura-calibre-40-a312-pe-6-hope>
- [55] N. R. Barrera Aguayo, “Tesis_Nicolas_Barrera_Aguayo”, Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2022. Consultado: el 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/8800907>
- [56] S. Sanz Hernán, “Validación de un modelo de turbulencia simplificado para la caracterización térmica de edificios”, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, Valladolid, 2018. Consultado: el 31 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31219>
- [57] O. Leonidivna y P. Bolívar, *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys*. Universidad Politécnica Salesiana, 2018. Consultado: el 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17052/1/Introduccion%20al%20analisis%20termico%20y%20de%20fluidos%20mediante%20Ansys.pdf>
- [58] Crane, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. Guadalajara.
- [59] Homecenter, “Codo 90 6 Cxc Sanitaria”. Consultado: el 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/234745/codo-90-6-cxc-sanitaria/234745/>
- [60] Ferreteria Samir, “Tee sanitario 6" gerfor”. Consultado: el 11 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ferreteriasamir.com/accesorios-pvc/35066-tee-sanitario-6-gerfor.html>
- [61] Soler & Palau, *Manual práctico de ventilación Soler & Palau*. Consultado: el 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/mven/spventilacionc2.pdf>
- [62] Casals, “Cómo calcular las renovaciones por hora según la actividad de un local”. Consultado: el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.casals.com/assets/uploads/editor/file/renovacion_de_aire_en_locales_tipicos_casals.pdf
- [63] soler&palau, “VENTILADORES HELICOCENTRÍFUGOS IN-LINE Serie TD-MIXVENT”. Consultado: el 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.solerpalau.com/es-es/ventiladores-en-linea-td-mixvent-92-serie/#product_section_description
- [64] Sodeca, “CATÁLOGO GENERAL SODECA COLOMBIA”. Consultado: el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sodeca.com/es/catalogos>

-
- [65] J. Felipe, N. Forero, y P. J. Áviles, “UNIVERSIDAD METROPOLITANA DE EDUCACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA”, UNIVERSIDAD METROPOLITANA DE EDUCACIÓN CIENCIA Y TECNOLOGÍA, Panamá, 2020. Consultado: el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.umecit.edu.pa/entities/publication/fb1030dd-ed90-437c-a6a6-f525df6a3c1a>
- [66] ktronix, “Aire Acondicionado CHALLENGER 18.000Btu Tipo Split Inverter 220V Blanco”. Consultado: el 16 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ktronix.com/aire-acondicionado-challenger-18000btu-tipo-split-inverter-220v-blanco/p/7705191043555>
- [67] ktronix, “Aire acondicionado SAMSUNG 12.000 Btu Tipo Split inverter WindFree220V Blanco AR12CVFCMWK/CB”. Consultado: el 16 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ktronix.com/aire-acondicionado-samsung-12000-btu-tipo-split-inverter-windfree220v-blanco-ar12cvfcmwk-cb/p/8806094786217>

ANEXOS

Anexo 1 Temperatura promedio en VVC descargados de la base de datos del IDEAM

Días	Promedio de TVVC	T Mín.	T Máx.
<21/01/2022			
1-ene	25,7	23,1	27,8
2-ene	25,4	22,2	27,8
3-ene	25,9	23	28,8
4-ene	25,9	23,8	30,1
5-ene	25,96666667	22	29,9
6-ene	28	23	32
7-ene	22,8	21,9	24
8-ene	25,93333333	23	29
9-ene	26,66666667	22,6	29,6
10-ene	24,93333333	22	27,8
11-ene	25,83333333	22,6	28,3
12-ene	23,4	21,2	25,2
13-ene	25,4	21,8	30
14-ene	26,86666667	23	30,2
21-ene	31,2	30,2	32,2
22-ene	31,55	29,8	33,3
23-ene	27,4	25,2	29
24-ene	26,93333333	24,6	29
25-ene	28,36666667	24,2	31,3
26-ene	28,86666667	25,2	31,4
27-ene	28,4	23	32,2
28-ene	28,4	24	31,2
29-ene	27,86666667	24	30,1
30-ene	27,93333333	25	29,8
31-ene	28,46666667	26	31
1-feb	28,96666667	24,4	32,3
2-feb	29,86666667	23	35,2
3-feb	28,86666667	24,4	32,2
4-feb	28,46666667	23,8	31,6
5-feb	23,73333333	22	26
6-feb	26,63333333	23	30
7-feb	27,46666667	23,4	30
8-feb	24,55	23	26,1
9-feb	23,6	20,6	25,2
10-feb	26,13333333	20,6	31

11-feb	24,66666667	24	25,2
12-feb	27,46666667	23	30
13-feb	27,4	23,2	31,6
14-feb	29,33333333	25,6	33
15-feb	26,36666667	24,2	27,6
16-feb	28,2	24	32
17-feb	28,53333333	23,8	32
18-feb	27,53333333	25,4	30,2
19-feb	26,66666667	24,7	28,2
20-feb	27,06666667	24	29,8
21-feb	28,73333333	24,8	32
22-feb	30,26666667	25	33,8
23-feb	30,26666667	28,8	32,6
24-feb	25,33333333	23,8	26,5
25-feb	26,73333333	25,2	29
26-feb	26,53333333	22,9	29,7
27-feb	22,63333333	22	23
28-feb	24,56666667	21,7	26,2
1-mar	26	23	27,6
2-mar	26,26666667	24	28,4
3-mar	23,86666667	21,8	27,6
4-mar	25,13333333	24	26,4
5-mar	28,06666667	23,2	31
6-mar	24,8	23	28,4
7-mar	27,56666667	22,8	31,8
8-mar	27,63333333	25	30,9
9-mar	27,6	24,4	29,8
10-mar	28	24	31,2
11-mar	27,1	24,2	31
12-mar	26,26666667	21,2	30,4
13-mar	24,8	24,4	25,4
14-mar	24,1	23,1	25
15-mar	26,86666667	23	30
16-mar	28,86666667	24,4	32
17-mar	27,86666667	25,2	29,8
18-mar	25,26666667	23,4	27,4
19-mar	27,33333333	24,4	30,4
20-mar	24,9	23,8	25,7
21-mar	27,93333333	24	30,8
22-mar	25,66666667	23,8	27,8
23-mar	26,4	23,4	28,2

24-mar	28,76666667	24,8	31,9
25-mar	27,8	25,2	32
26-mar	28,26666667	24,4	31
27-mar	25,2	23	27,4
28-mar	25,73333333	23,4	27
29-mar	25,86666667	23	27,8
30-mar	26,6	22,4	31
31-mar	28	24	30,2
1-abr	28,4	25,2	31
2-abr	26,8	25,2	29,2
3-abr	26,2	23,8	28
4-abr	26,8	24	28,4
5-abr	25,06666667	22,2	27
6-abr	26,46666667	23,8	30,6
7-abr	25,66666667	23	27,2
8-abr	27,1	23,3	31,2
9-abr	27,5	23,9	31
10-abr	27,46666667	22,2	32
11-abr	26,13333333	23,4	30,4
12-abr	27,56666667	24,8	31,2
13-abr	27,56666667	24,9	32
14-abr	28,33333333	25,4	32,4
15-abr	26,9	23,4	30,9
16-abr	22,53333333	21,8	23,2
17-abr	23,86666667	21	26,6
18-abr	24,06666667	23,4	25,2
19-abr	25,4	21	27,8
20-abr	24,2	21	26
21-abr	25,13333333	21,8	26,8
22-abr	25,8	22	30,4
23-abr	23,53333333	22,8	24,6
24-abr	24,66666667	22	28
25-abr	26	21,3	30,8
26-abr	26,06666667	21,4	29,2
27-abr	23,46666667	22,2	24,2
28-abr	25,2	22	27,2
29-abr	25	21,8	28,2
30-abr	22,93333333	22,2	23,8
1-may	26	20,8	29,4
2-may	25,73333333	22,6	29,6
3-may	27,93333333	24	31

4-may	27,93333333	24,1	31,1
5-may	22,5	21,9	23,2
6-may	23,6	21,8	25
7-may	22,66666667	22	23,2
8-may	25,56666667	21,7	28
9-may	25,53333333	22,2	29
10-may	26,2	23	29,2
11-may	24,66666667	22	26,6
12-may	26,66666667	22,8	29,6
13-may	25,8	22	28,2
14-may	24,46666667	22,8	25,8
15-may	27,53333333	22,6	31
16-may	24,93333333	22	27,4
17-may	25,73333333	22,2	27,6
18-may	22,53333333	21,6	23,8
19-may	23,06666667	21,4	25,8
20-may	23,73333333	21	26
21-may	25,36666667	20,5	27,9
22-may	26	22	29,2
23-may	23,8	21,5	27
24-may	25,43333333	22,4	29,4
25-may	23,66666667	22,2	25,2
26-may	26,06666667	22,2	29,4
27-may	25,06666667	21,8	28,2
28-may	25,66666667	22,4	29,2
29-may	24,6	21	26,4
30-may	25,56666667	22,4	28
31-may	25,8	21,9	30,9
1-jun	25,06666667	21,4	28,8
2-jun	25,36666667	22,1	29
3-jun	24,66666667	22,8	27,2
4-jun	24,66666667	22	29
5-jun	25,2	21,4	28
6-jun	26,46666667	23,8	28,8
7-jun	24	21,8	26,2
8-jun	24,6	23,6	25,8
9-jun	25,36666667	22,4	27,7
10-jun	27	22,4	31
11-jun	23,6	21,9	24,9
12-jun	23,66666667	21	26
13-jun	21,06666667	20	22

14-jun	23,86666667	20,6	26
15-jun	25,73333333	22,2	28,4
16-jun	25,26666667	22,4	27
17-jun	24,33333333	23,4	25,6
18-jun	23,4	22	24,4
19-jun	24,46666667	22,6	28,2
20-jun	24,06666667	21	28,2
21-jun	25,4	22	28,2
22-jun	25,26666667	22	29,2
23-jun	23,4	21	26,2
24-jun	23,86666667	21	28,2
25-jun	23	20,5	25,1
26-jun	23,26666667	21,2	25,2
27-jun	24,96666667	20,8	29,1
28-jun	25,4	22	30,6
29-jun	24,73333333	21,2	28
30-jun	25,93333333	23	29,4
1-jul	24,66666667	21	29
2-jul	22,86666667	21,6	23,6
3-jul	25,4	22,2	29,2
4-jul	25,16666667	22	27,2
5-jul	25,86666667	21,8	29,6
6-jul	26,66666667	23	29
7-jul	26,66666667	21,2	30
8-jul	22,06666667	22	22,2
9-jul	25,4	21,2	28
10-jul	26,86666667	22	30,2
11-jul	22,93333333	22,2	23,6
12-jul	25,73333333	21	30
13-jul	26,13333333	21,6	29,6
14-jul	26,86666667	22	30
15-jul	24,96666667	22,3	27,6
16-jul	27	22	30
17-jul	24,8	22,4	27,8
18-jul	24,33333333	22	27
19-jul	22	22	22
20-jul	24	21	26,4
21-jul	25,53333333	23	27,2
22-jul	25,53333333	22	29
23-jul	24,13333333	22,4	25,2
24-jul	24,53333333	20,9	28,7

25-jul	25,66666667	22,2	28,4
26-jul	25,96666667	21,9	29
27-jul	25,66666667	22,2	29,8
28-jul	26,16666667	21,7	28,8
29-jul	24,86666667	22,2	29,2
30-jul	27,16666667	23	29,9
31-jul	25,13333333	20,8	28
1-ago	25,33333333	22,2	29
2-ago	22,8	22,2	23,2
3-ago	26,6	22,2	30,2
4-ago	26,66666667	23	30
5-ago	25,16666667	23,4	27
6-ago	26,46666667	22,9	28,8
7-ago	26,86666667	22,6	29,8
8-ago	28,06666667	21,9	31,3
9-ago	23,13333333	21,4	24
10-ago	25,3	22,4	28,7
11-ago	27,23333333	22,2	30,8
12-ago	25,86666667	21,2	30,2
13-ago	24,13333333	21	29
14-ago	22,2	22	22,6
15-ago	25,73333333	21,2	29
16-ago	26,8	22	31
17-ago	28,46666667	22,8	32,8
18-ago	28	21,4	33
19-ago	27,93333333	22,8	32
20-ago	21,93333333	21,2	23
21-ago	22,13333333	20	23,4
22-ago	23,03333333	19,6	25,5
23-ago	25,16666667	19,4	30,1
24-ago	26,13333333	21,4	30,8
25-ago	26,13333333	21,2	31
26-ago	25,93333333	22,8	30,8
27-ago	25,6	21,3	29,9
28-ago	24,8	23	27
29-ago	23,06666667	21,2	25
30-ago	24,33333333	20	30
31-ago	25,73333333	22,4	29,2
1-sep	26,33333333	22	30,2
2-sep	25,73333333	22,2	28
3-sep	22,16666667	21,2	23,1

4-sep	23,8	21,2	25,6
5-sep	24,06666667	21,5	26,7
6-sep	27,16666667	21,8	30,7
7-sep	27,5	22,7	31,2
8-sep	27,73333333	22	31,2
9-sep	23,33333333	22	24
10-sep	23,26666667	22	25
11-sep	26,6	21,2	31,8
12-sep	26,93333333	25	30,8
13-sep	26,2	21	30,6
14-sep	27,13333333	22,6	29,8
15-sep	28,06666667	23	31
16-sep	22,4	22	23
17-sep	26,4	22	29,8
18-sep	26,73333333	22	30
19-sep	27,63333333	25	30,8
20-sep	26,3	21	30,9
21-sep	22,66666667	21,4	23,6
22-sep	26,46666667	22	31,2
23-sep	26,86666667	23	31,6
24-sep	22,73333333	22	24
25-sep	25,93333333	19,4	29,4
26-sep	26,53333333	22	31,4
27-sep	27,66666667	23,2	31,8
28-sep	23,03333333	23	23,1
29-sep	26,6	21	31
30-sep	25,73333333	22,2	31
1-oct	24,83333333	21,5	28
2-oct	25,93333333	22,2	29,8
3-oct	26,93333333	22	30,2
4-oct	27,4	23,4	31,2
5-oct	26,8	23	31,2
6-oct	26,6	23	30
7-oct	27,46666667	23,8	30,4
8-oct	23,13333333	22,2	23,8
9-oct	26,26666667	20,6	30,6
10-oct	28,26666667	23,8	31,6
11-oct	25,6	22,4	28,8
12-oct	26,8	23,4	30,2
13-oct	26,6	22	31,2
14-oct	26,9	23,8	30

15-oct	24,8	23,4	26,8
16-oct	25,76666667	22	28,8
17-oct	26	22,9	29,1
18-oct	25,53333333	23,4	27,2
19-oct	25,2	23	29,6
20-oct	26,73333333	22,2	30,2
21-oct	26,4	23,8	28,9
22-oct	26,06666667	23	30
23-oct	26,03333333	23,7	29,9
24-oct	26,13333333	22	31
25-oct	26,2	22,4	29,8
26-oct	25,73333333	23	29
27-oct	26,73333333	23,4	30,8
28-oct	26,13333333	24,2	27,2
29-oct	23,4	22,4	24,8
30-oct	24,06666667	22,2	25,4
31-oct	26,7	22,8	30,3
1-nov	28,66666667	25,2	31,6
2-nov	22,26666667	22	22,4
3-nov	20,5	18,8	21,9
4-nov	22,6	19	25
5-nov	24,63333333	20,1	28,8
6-nov	26,76666667	24	30,2
7-nov	27,26666667	24	31
8-nov	26,4	22,8	30,2
9-nov	25,43333333	23	28,3
10-nov	26,2	23,2	28,6
11-nov	23,66666667	22,4	26
12-nov	25,26666667	22,1	29
13-nov	26	23,2	29
14-nov	25,96666667	22,9	28
15-nov	27	24	30
16-nov	23,66666667	22	25
17-nov	25,4	23	28,8
18-nov	25,06666667	22	27,8
19-nov	25,76666667	21,6	30,7
20-nov	27,2	23	30,6
21-nov	26,03333333	23,8	29
22-nov	25,33333333	22,2	29
23-nov	25,16666667	22,7	29,8
24-nov	25,56666667	22	29,3

25-nov	26,4	22	29
26-nov	25,4	23,8	26,2
27-nov	23,73333333	22	25,2
28-nov	25,2	22,4	29,2
29-nov	23,4	22	24,2
30-nov	25,2	22,4	27,2
1-dic	23,73333333	23	25
2-dic	25,8	23	29
3-dic	26,2	23	30,6
4-dic	24,53333333	23	26
5-dic	25,8	22,4	30
6-dic	23,73333333	21,6	26,4
7-dic	26	22,2	29,6
8-dic	26	22,1	29,9
9-dic	26,46666667	23	30,2
10-dic	24,8	22,8	27,2
11-dic	24,46666667	23,4	26,2
12-dic	25,63333333	23	28,5
13-dic	24,03333333	21,8	27,3
14-dic	26,4	22,4	30,4
15-dic	27,33333333	22,8	30,8
16-dic	26,86666667	24	30,4
17-dic	26,93333333	23,2	30,8
18-dic	26,8	21,8	30,4
19-dic	26,16666667	20,4	30,3
20-dic	26,46666667	22	30,4
21-dic	27,93333333	24,2	31
22-dic	26,86666667	22,7	30,1
23-dic	27,4	24	30,2
24-dic	26,26666667	21	31
25-dic	27	23,4	30,6
26-dic	26,76666667	21,9	30,4
27-dic	27,6	22	32,8
28-dic	27,26666667	22,1	31,3
29-dic	28	25	31
30-dic	27,03333333	24,5	29,6
31-dic	27,73333333	25	30,4
Total, general	25,79	18,8	35,2

Anexo 2 Temperatura del suelo a diferentes profundidades diaria.

Fecha	0 m	2 m	5 m	8 m	10 m	30 m
1-ene	32,09	20,74	29,47	23,42	27,51	25,68
2-ene	32,14	20,78	29,47	23,4	27,49	25,68
3-ene	32,19	20,81	29,47	23,39	27,47	25,68
4-ene	32,24	20,85	29,46	23,38	27,46	25,68
5-ene	32,28	20,89	29,46	23,37	27,44	25,68
6-ene	32,33	20,93	29,45	23,36	27,42	25,68
7-ene	32,37	20,97	29,44	23,35	27,4	25,67
8-ene	32,41	21,01	29,44	23,34	27,38	25,67
9-ene	32,45	21,06	29,43	23,33	27,37	25,67
10-ene	32,48	21,1	29,42	23,32	27,35	25,67
11-ene	32,52	21,15	29,41	23,31	27,33	25,67
12-ene	32,55	21,2	29,39	23,31	27,3	25,67
13-ene	32,58	21,25	29,38	23,3	27,28	25,67
14-ene	32,61	21,3	29,36	23,3	27,26	25,66
15-ene	32,63	21,35	29,35	23,29	27,24	25,66
16-ene	32,66	21,4	29,33	23,29	27,22	25,66
17-ene	32,68	21,46	29,31	23,29	27,2	25,66
18-ene	32,7	21,52	29,3	23,28	27,17	25,66
19-ene	32,71	21,57	29,28	23,28	27,15	25,66
20-ene	32,73	21,63	29,25	23,28	27,12	25,66
21-ene	32,74	21,69	29,23	23,28	27,1	25,66
22-ene	32,75	21,75	29,21	23,28	27,08	25,65
23-ene	32,76	21,82	29,19	23,29	27,05	25,65
24-ene	32,77	21,88	29,16	23,29	27,02	25,65
25-ene	32,78	21,95	29,13	23,29	27	25,65
26-ene	32,78	22,01	29,11	23,3	26,97	25,65
27-ene	32,78	22,08	29,08	23,3	26,95	25,65
28-ene	32,78	22,15	29,05	23,31	26,92	25,65
29-ene	32,78	22,22	29,02	23,31	26,89	25,65
30-ene	32,77	22,29	28,99	23,32	26,86	25,65
31-ene	32,76	22,36	28,96	23,33	26,84	25,65
1-feb	32,75	22,43	28,92	23,34	26,81	25,65
2-feb	32,74	22,51	28,89	23,34	26,78	25,64
3-feb	32,73	22,58	28,86	23,35	26,75	25,64
4-feb	32,71	22,65	28,82	23,36	26,72	25,64
5-feb	32,7	22,73	28,78	23,38	26,69	25,64
6-feb	32,68	22,81	28,75	23,39	26,66	25,64
7-feb	32,66	22,89	28,71	23,4	26,63	25,64

8-feb	32,63	22,97	28,67	23,41	26,6	25,64
9-feb	32,61	23,05	28,63	23,43	26,57	25,64
10-feb	32,58	23,13	28,59	23,44	26,54	25,64
11-feb	32,55	23,21	28,55	23,46	26,51	25,64
12-feb	32,52	23,29	28,5	23,47	26,48	25,64
13-feb	32,48	23,37	28,46	23,49	26,45	25,64
14-feb	32,45	23,46	28,42	23,51	26,42	25,64
15-feb	32,41	23,54	28,37	23,53	26,38	25,64
16-feb	32,37	23,63	28,33	23,55	26,35	25,64
17-feb	32,33	23,71	28,28	23,57	26,32	25,64
18-feb	32,28	23,8	28,23	23,59	26,29	25,64
19-feb	32,24	23,88	28,19	23,61	26,26	25,64
20-feb	32,19	23,97	28,14	23,63	26,22	25,64
21-feb	32,14	24,06	28,09	23,65	26,19	25,64
22-feb	32,09	24,15	28,04	23,67	26,16	25,64
23-feb	32,04	24,24	27,99	23,7	26,12	25,64
24-feb	31,98	24,33	27,94	23,72	26,09	25,64
25-feb	31,93	24,42	27,88	23,75	26,06	25,64
26-feb	31,87	24,51	27,83	23,77	26,03	25,64
27-feb	31,81	24,6	27,78	23,8	25,99	25,64
28-feb	31,75	24,69	27,73	23,82	25,96	25,64
29-feb	31,68	24,78	27,67	23,85	25,93	25,64
1-mar	31,62	24,87	27,62	23,88	25,89	25,64
2-mar	31,55	24,96	27,56	23,91	25,86	25,65
3-mar	31,48	25,06	27,51	23,93	25,83	25,65
4-mar	31,41	25,15	27,45	23,96	25,79	25,65
5-mar	31,34	25,24	27,39	23,99	25,76	25,65
6-mar	31,26	25,33	27,34	24,02	25,73	25,65
7-mar	31,19	25,43	27,28	24,06	25,69	25,65
8-mar	31,11	25,52	27,22	24,09	25,66	25,65
9-mar	31,03	25,61	27,16	24,12	25,63	25,65
10-mar	30,95	25,71	27,1	24,15	25,59	25,65
11-mar	30,87	25,8	27,04	24,18	25,56	25,65
12-mar	30,79	25,89	26,98	24,22	25,53	25,65
13-mar	30,7	25,98	26,92	24,25	25,49	25,66
14-mar	30,61	26,08	26,86	24,29	25,46	25,66
15-mar	30,53	26,17	26,8	24,32	25,43	25,66
16-mar	30,44	26,26	26,74	24,36	25,39	25,66
17-mar	30,35	26,36	26,68	24,39	25,36	25,66
18-mar	30,25	26,45	26,62	24,43	25,33	25,66
19-mar	30,16	26,54	26,55	24,46	25,3	25,66

20-mar	30,07	26,63	26,49	24,5	25,26	25,66
21-mar	29,97	26,72	26,43	24,54	25,23	25,67
22-mar	29,87	26,82	26,37	24,57	25,2	25,67
23-mar	29,78	26,91	26,31	24,61	25,17	25,67
24-mar	29,68	27	26,24	24,65	25,14	25,67
25-mar	29,58	27,09	26,18	24,69	25,11	25,67
26-mar	29,47	27,18	26,12	24,73	25,07	25,67
27-mar	29,37	27,27	26,05	24,77	25,04	25,67
28-mar	29,27	27,36	25,99	24,81	25,01	25,68
29-mar	29,16	27,45	25,93	24,85	24,98	25,68
30-mar	29,06	27,54	25,86	24,89	24,95	25,68
31-mar	28,95	27,62	25,8	24,93	24,92	25,68
1-abr	28,84	27,71	25,74	24,97	24,89	25,68
2-abr	28,73	27,8	25,67	25,01	24,86	25,69
3-abr	28,62	27,88	25,61	25,05	24,83	25,69
4-abr	28,51	27,97	25,55	25,09	24,81	25,69
5-abr	28,4	28,05	25,48	25,13	24,78	25,69
6-abr	28,29	28,14	25,42	25,17	24,75	25,69
7-abr	28,18	28,22	25,36	25,22	24,72	25,69
8-abr	28,06	28,3	25,29	25,26	24,69	25,7
9-abr	27,95	28,39	25,23	25,3	24,67	25,7
10-abr	27,84	28,47	25,17	25,34	24,64	25,7
11-abr	27,72	28,55	25,11	25,39	24,61	25,7
12-abr	27,6	28,63	25,04	25,43	24,58	25,7
13-abr	27,49	28,71	24,98	25,47	24,56	25,71
14-abr	27,37	28,79	24,92	25,51	24,53	25,71
15-abr	27,25	28,86	24,86	25,56	24,51	25,71
16-abr	27,14	28,94	24,8	25,6	24,48	25,71
17-abr	27,02	29,01	24,74	25,64	24,46	25,72
18-abr	26,9	29,09	24,68	25,69	24,43	25,72
19-abr	26,78	29,16	24,62	25,73	24,41	25,72
20-abr	26,66	29,23	24,56	25,77	24,39	25,72
21-abr	26,54	29,3	24,5	25,82	24,36	25,72
22-abr	26,42	29,38	24,44	25,86	24,34	25,73
23-abr	26,3	29,44	24,38	25,9	24,32	25,73
24-abr	26,18	29,51	24,32	25,95	24,3	25,73
25-abr	26,06	29,58	24,26	25,99	24,28	25,73
26-abr	25,94	29,65	24,21	26,03	24,26	25,74
27-abr	25,82	29,71	24,15	26,07	24,24	25,74
28-abr	25,7	29,77	24,09	26,12	24,22	25,74
29-abr	25,58	29,84	24,04	26,16	24,2	25,74

30-abr	25,46	29,9	23,98	26,2	24,18	25,75
1-may	25,34	29,96	23,93	26,24	24,16	25,75
2-may	25,22	30,02	23,87	26,29	24,14	25,75
3-may	25,1	30,07	23,82	26,33	24,13	25,75
4-may	24,98	30,13	23,76	26,37	24,11	25,76
5-may	24,86	30,18	23,71	26,41	24,09	25,76
6-may	24,74	30,24	23,66	26,46	24,08	25,76
7-may	24,62	30,29	23,61	26,5	24,06	25,76
8-may	24,5	30,34	23,56	26,54	24,05	25,77
9-may	24,39	30,39	23,51	26,58	24,03	25,77
10-may	24,27	30,44	23,46	26,62	24,02	25,77
11-may	24,15	30,49	23,41	26,66	24	25,77
12-may	24,03	30,53	23,36	26,7	23,99	25,78
13-may	23,92	30,58	23,31	26,74	23,98	25,78
14-may	23,8	30,62	23,27	26,78	23,97	25,78
15-may	23,69	30,66	23,22	26,82	23,96	25,78
16-may	23,57	30,7	23,18	26,86	23,95	25,79
17-may	23,46	30,74	23,13	26,9	23,94	25,79
18-may	23,35	30,77	23,09	26,94	23,93	25,79
19-may	23,23	30,81	23,05	26,97	23,92	25,79
20-may	23,12	30,84	23	27,01	23,91	25,8
21-may	23,01	30,88	22,96	27,05	23,9	25,8
22-may	22,9	30,91	22,92	27,09	23,89	25,8
23-may	22,79	30,94	22,88	27,12	23,89	25,8
24-may	22,68	30,96	22,85	27,16	23,88	25,81
25-may	22,58	30,99	22,81	27,2	23,88	25,81
26-may	22,47	31,02	22,77	27,23	23,87	25,81
27-may	22,36	31,04	22,73	27,27	23,87	25,82
28-may	22,26	31,06	22,7	27,3	23,86	25,82
29-may	22,16	31,08	22,67	27,34	23,86	25,82
30-may	22,05	31,1	22,63	27,37	23,86	25,82
31-may	21,95	31,12	22,6	27,4	23,85	25,83
1-jun	21,85	31,13	22,57	27,44	23,85	25,83
2-jun	21,75	31,15	22,54	27,47	23,85	25,83
3-jun	21,66	31,16	22,51	27,5	23,85	25,83
4-jun	21,56	31,17	22,48	27,53	23,85	25,84
5-jun	21,47	31,18	22,45	27,56	23,85	25,84
6-jun	21,37	31,19	22,43	27,59	23,85	25,84
7-jun	21,28	31,19	22,4	27,62	23,85	25,84
8-jun	21,19	31,2	22,38	27,65	23,86	25,84
9-jun	21,1	31,2	22,35	27,68	23,86	25,85

10-jun	21,01	31,2	22,33	27,71	23,86	25,85
11-jun	20,92	31,2	22,31	27,74	23,87	25,85
12-jun	20,84	31,2	22,29	27,76	23,87	25,85
13-jun	20,75	31,19	22,27	27,79	23,88	25,86
14-jun	20,67	31,19	22,25	27,81	23,88	25,86
15-jun	20,59	31,18	22,24	27,84	23,89	25,86
16-jun	20,51	31,17	22,22	27,86	23,9	25,86
17-jun	20,43	31,16	22,21	27,89	23,9	25,87
18-jun	20,35	31,15	22,19	27,91	23,91	25,87
19-jun	20,28	31,14	22,18	27,93	23,92	25,87
20-jun	20,21	31,12	22,17	27,96	23,93	25,87
21-jun	21,14	31,11	22,16	27,98	23,94	25,87
22-jun	20,07	31,09	22,15	28	23,95	25,88
23-jun	20	31,07	22,14	28,02	23,96	25,88
24-jun	19,93	31,05	22,13	28,04	23,97	25,88
25-jun	19,87	31,02	22,12	28,06	23,98	25,88
26-jun	19,8	31	22,12	28,07	24	25,88
27-jun	19,74	30,97	22,11	28,09	24,01	25,89
28-jun	19,68	30,95	22,11	28,11	24,02	25,89
29-jun	19,62	30,92	22,11	28,12	24,04	25,89
30-jun	19,57	30,89	22,11	28,14	24,05	25,89
1-jul	19,51	30,85	22,11	28,15	24,07	25,89
2-jul	19,46	30,82	22,11	28,17	24,08	25,9
3-jul	19,41	30,79	22,11	28,18	24,1	25,9
4-jul	19,36	30,75	22,11	28,19	24,11	25,9
5-jul	19,32	30,71	22,12	28,21	24,13	25,9
6-jul	19,27	30,67	22,12	28,22	24,15	25,9
7-jul	19,23	30,63	22,13	28,23	24,17	25,9
8-jul	19,19	30,59	22,14	28,24	24,19	25,91
9-jul	19,15	30,55	22,15	28,25	24,2	25,91
10-jul	19,11	30,5	22,16	28,25	24,22	25,91
11-jul	19,08	30,45	22,17	28,26	24,24	25,91
12-jul	19,05	30,41	22,18	28,27	24,26	25,91
13-jul	19,02	30,36	22,19	28,28	24,29	25,91
14-jul	18,99	30,31	22,21	28,28	24,31	25,92
15-jul	18,96	30,26	22,22	28,28	24,33	25,92
16-jul	18,94	30,2	22,24	28,29	24,35	25,92
17-jul	18,91	30,15	22,26	28,29	24,37	25,92
18-jul	18,89	30,09	22,28	28,29	24,4	25,92
19-jul	18,87	30,03	22,29	28,3	24,42	25,92
20-jul	18,86	29,98	22,32	28,3	24,44	25,92

21-jul	18,84	29,92	22,34	28,3	24,47	25,92
22-jul	18,83	29,86	22,36	28,3	24,49	25,93
23-jul	18,82	29,79	22,38	28,29	24,52	25,93
24-jul	18,81	29,73	22,41	28,29	24,54	25,93
25-jul	18,81	29,67	22,43	28,29	24,57	25,93
26-jul	18,8	29,6	22,46	28,29	24,59	25,93
27-jul	18,8	29,53	22,49	28,28	24,62	25,93
28-jul	18,8	29,47	22,52	28,28	24,65	25,93
29-jul	18,8	29,4	22,54	28,27	24,68	25,93
30-jul	18,81	29,33	22,58	28,26	24,7	25,93
31-jul	18,81	29,26	22,61	28,26	24,73	25,93
1-ago	18,82	29,18	22,64	28,25	24,76	25,93
2-ago	18,83	29,11	22,67	28,24	24,79	25,93
3-ago	18,84	29,04	22,71	28,23	24,82	25,94
4-ago	18,86	28,96	22,74	28,22	24,84	25,94
5-ago	18,87	28,89	22,78	28,21	24,87	25,94
6-ago	18,89	28,81	22,81	28,2	24,9	25,94
7-ago	18,91	28,73	22,85	28,19	24,93	25,94
8-ago	18,94	28,65	22,89	28,17	24,96	25,94
9-ago	18,96	28,57	22,93	28,16	24,99	25,94
10-ago	18,99	28,49	22,97	28,14	25,02	25,94
11-ago	19,02	28,41	23,01	28,13	25,06	25,94
12-ago	19,05	28,33	23,05	28,11	25,09	25,94
13-ago	19,08	28,25	23,1	28,1	25,12	25,94
14-ago	19,11	28,17	23,14	28,08	25,15	25,94
15-ago	19,15	28,08	23,18	28,06	25,18	25,94
16-ago	19,19	28	23,23	28,04	25,21	25,94
17-ago	19,23	27,91	23,28	28,02	25,24	25,94
18-ago	19,27	27,83	23,32	28	25,28	25,94
19-ago	19,32	27,74	23,37	27,98	25,31	25,94
20-ago	19,36	27,65	23,42	27,96	25,34	25,94
21-ago	19,41	27,56	23,47	27,94	25,37	25,94
22-ago	19,46	27,48	23,52	27,92	25,41	25,94
23-ago	19,51	27,39	23,57	27,89	25,44	25,94
24-ago	19,57	27,3	23,62	27,87	25,47	25,94
25-ago	19,62	27,21	23,67	27,85	25,51	25,94
26-ago	19,68	27,12	23,72	27,82	25,54	25,94
27-ago	19,74	27,03	23,77	27,8	25,57	25,94
28-ago	19,8	26,94	23,83	27,77	25,6	25,94
29-ago	19,87	26,85	23,88	27,74	25,64	25,94
30-ago	19,93	26,75	23,94	27,72	25,67	25,94

31-ago	20	26,66	23,99	27,69	25,7	25,93
1-sep	20,07	26,57	24,05	27,66	25,74	25,93
2-sep	20,13	26,48	24,1	27,63	25,77	25,93
3-sep	20,21	26,39	24,16	27,6	25,8	25,93
4-sep	20,28	26,29	24,22	27,57	25,84	25,93
5-sep	20,35	26,2	24,27	27,54	25,87	25,93
6-sep	20,43	26,11	24,33	27,51	25,9	25,93
7-sep	20,51	26,01	24,39	27,48	25,94	25,93
8-sep	20,59	25,92	24,45	27,45	25,97	25,93
9-sep	20,67	25,83	24,51	27,41	26	25,93
10-sep	20,75	25,74	24,57	27,38	26,04	25,93
11-sep	20,84	25,64	24,63	27,35	26,07	25,93
12-sep	20,92	25,55	24,69	27,31	26,1	25,92
13-sep	21,01	25,46	24,75	27,28	26,14	25,92
14-sep	21,1	25,36	24,81	27,24	26,17	25,92
15-sep	21,19	25,27	24,87	27,21	26,2	25,92
16-sep	21,28	25,18	24,93	27,17	26,23	25,92
17-sep	21,37	25,09	24,99	27,14	26,27	25,92
18-sep	21,47	24,99	25,06	27,1	26,3	25,92
19-sep	21,56	24,9	25,12	27,06	26,33	25,92
20-sep	21,66	24,81	25,18	27,02	26,36	25,91
21-sep	21,75	24,72	25,24	26,99	26,4	25,91
22-sep	21,85	24,63	25,31	26,95	26,43	25,91
23-sep	21,95	24,54	25,37	26,91	26,46	25,91
24-sep	22,05	24,45	25,43	26,87	26,49	25,91
25-sep	22,16	24,36	25,5	26,83	26,52	25,91
26-sep	22,26	24,27	25,56	26,79	26,55	25,9
27-sep	22,36	24,18	25,62	26,75	26,58	25,9
28-sep	22,47	24,09	25,68	26,71	26,61	25,9
29-sep	22,58	24	25,75	26,67	26,64	25,9
30-sep	22,68	23,91	25,81	26,63	26,67	25,9
1-oct	22,79	23,83	25,88	26,59	26,7	25,9
2-oct	22,9	23,74	25,94	26,55	26,73	25,89
3-oct	23,01	23,65	26	26,51	26,76	25,89
4-oct	23,12	23,57	26,07	26,47	26,79	25,89
5-oct	23,23	23,48	26,13	26,43	26,82	25,89
6-oct	23,35	23,4	26,19	26,38	26,85	25,89
7-oct	23,46	23,32	26,25	26,34	26,87	25,88
8-oct	23,57	23,23	26,32	26,3	26,9	25,88
9-oct	23,69	23,15	26,38	26,26	26,93	25,88
10-oct	23,8	23,07	26,44	26,22	26,96	25,88

11-oct	23,92	22,99	26,5	26,17	26,98	25,88
12-oct	24,03	22,91	26,57	26,13	27,01	25,87
13-oct	24,15	22,83	26,63	26,09	27,03	25,87
14-oct	24,27	22,76	26,69	26,04	27,06	25,87
15-oct	24,39	22,68	26,75	26	27,08	25,87
16-oct	24,5	22,6	26,81	25,96	27,11	25,87
17-oct	24,62	22,53	26,87	25,92	27,13	25,86
18-oct	24,74	22,46	26,93	25,87	27,16	25,86
19-oct	24,86	22,38	26,99	25,83	27,18	25,86
20-oct	24,98	22,31	27,05	25,79	27,2	25,86
21-oct	25,1	22,24	27,11	25,74	27,23	25,85
22-oct	25,22	22,17	27,17	25,7	27,25	25,85
23-oct	25,34	22,1	27,23	25,66	27,27	25,85
24-oct	25,46	22,03	27,29	25,61	27,29	25,85
25-oct	25,58	21,97	27,35	25,57	27,31	25,84
26-oct	25,7	21,9	27,4	25,53	27,33	25,84
27-oct	25,82	21,84	27,46	25,48	27,35	25,84
28-oct	25,94	21,78	27,52	25,44	27,37	25,84
29-oct	26,06	21,71	27,57	25,4	27,39	25,83
30-oct	26,18	21,65	27,63	25,36	27,41	25,83
31-oct	26,3	21,59	27,68	25,31	27,43	25,83
1-nov	26,42	21,54	27,74	25,27	27,45	25,83
2-nov	26,54	21,48	27,79	25,23	27,46	25,82
3-nov	26,66	21,42	27,84	25,19	27,48	25,82
4-nov	26,78	21,37	27,89	25,15	27,5	25,82
5-nov	26,9	21,32	27,95	25,1	27,51	25,82
6-nov	27,02	21,26	28	25,06	27,53	25,81
7-nov	27,14	21,21	28,05	25,02	27,54	25,81
8-nov	27,25	21,16	28,1	24,98	27,56	25,81
9-nov	27,37	21,12	28,15	24,94	27,57	25,81
10-nov	27,49	21,07	28,19	24,9	27,58	25,8
11-nov	27,6	21,03	28,24	24,86	27,59	25,8
12-nov	27,72	20,98	28,29	24,82	27,61	25,8
13-nov	27,84	20,94	28,34	24,78	27,62	25,8
14-nov	27,95	20,9	28,38	24,74	27,63	25,79
15-nov	28,06	20,86	28,43	24,7	27,64	25,79
16-nov	28,18	20,82	28,47	24,66	27,65	25,79
17-nov	28,29	20,79	28,51	24,62	27,66	25,79
18-nov	28,4	20,75	28,56	24,59	27,67	25,78
19-nov	28,51	20,72	28,6	24,55	27,68	25,78
20-nov	28,62	20,69	28,64	24,51	27,68	25,78

21-nov	28,73	20,66	28,68	24,47	27,69	25,78
22-nov	28,84	20,63	28,72	24,44	27,7	25,77
23-nov	28,95	20,6	28,75	24,4	27,7	25,77
24-nov	29,06	20,58	28,79	24,37	27,71	25,77
25-nov	29,16	20,55	28,83	24,33	27,71	25,77
26-nov	29,27	20,53	28,86	24,3	27,72	25,76
27-nov	29,37	20,51	28,9	24,26	27,72	25,76
28-nov	29,47	20,49	28,93	24,23	27,72	25,76
29-nov	29,58	20,47	28,96	24,19	27,73	25,76
30-nov	29,68	20,46	29	24,16	27,73	25,75
1-dic	29,78	20,44	29,03	24,13	27,73	25,75
2-dic	29,87	20,43	29,06	24,1	27,73	25,75
3-dic	29,97	20,42	29,08	24,06	27,73	25,75
4-dic	30,07	20,41	29,11	24,03	27,73	25,74
5-dic	30,16	20,4	29,14	24	27,73	25,74
6-dic	30,25	20,39	29,16	23,97	27,73	25,74
7-dic	30,35	20,39	29,19	23,94	27,72	25,74
8-dic	30,44	20,38	29,21	23,91	27,72	25,73
9-dic	30,53	20,38	29,24	23,89	27,72	25,73
10-dic	30,61	20,38	29,26	23,86	27,72	25,73
11-dic	30,7	20,38	29,28	23,83	27,71	25,73
12-dic	30,79	20,39	29,3	23,8	27,71	25,72
13-dic	30,87	20,39	29,32	23,78	27,7	25,72
14-dic	30,95	20,4	29,34	23,75	27,69	25,72
15-dic	31,03	20,4	29,35	23,73	27,69	25,72
16-dic	31,11	20,41	29,37	23,7	27,68	25,72
17-dic	31,19	20,42	29,38	23,68	27,67	25,71
18-dic	31,26	20,44	29,4	23,66	27,66	25,71
19-dic	31,34	20,45	29,41	23,64	27,66	25,71
20-dic	31,41	20,47	29,42	23,61	27,65	25,71
21-dic	31,48	20,48	29,43	23,59	27,64	25,7
22-dic	31,55	20,5	29,44	23,57	27,63	25,7
23-dic	31,62	20,52	29,45	23,55	27,61	25,7
24-dic	31,68	20,54	29,45	23,53	27,6	25,7
25-dic	31,75	20,57	29,46	23,51	27,59	25,7
26-dic	31,81	20,59	29,46	23,5	27,58	25,69
27-dic	31,87	20,62	29,47	23,48	27,56	25,69
28-dic	31,93	20,65	29,47	23,46	27,55	25,69
29-dic	31,98	20,68	29,47	23,45	27,54	25,69
30-dic	32,04	20,71	29,47	23,43	27,52	25,69

Anexo 3 Cálculo teórico que se aplica para la configuración 1 y 2 en el software EES.

```
"Datos"
rho= 1,2 [kg/m^3] "Densidad"
Cp= 1007 [J/kg*K] "Calor especifico"
k=0,02 [W/m*K] "Conductividad termica"
Pr=0,73 "Numero de prandtl"
Viscosidad=0,000015 [m^2/s] "Viscosidad cinematica del aire"
T_in=31,55 [°C] "Temperatura de entrada del aire promedio para el dia 22 de febrero"
T_suelo=23,92 [°C] "Temperatura del suelo a 10 m promedio para el mes de junio"
V_flujo=0,08 [m^3/s] "Caudal requerido"
"L=30 [m]" "Longitud de la tuberia"
Codoso=10
Tee=0
D=0,1522 [m] "Diametro de la tuberia"
epsilon=0,0015 "Aspereza pvc"
g=9,81 [m/s^2] "Gravedad"
"Ecuaciones"
At=(pi*D^2)/4 "Area transversal"
As=pi*D*L "Area superficial"
masico=rho*V_flujo "Flujo masico"
V_prom=V_flujo/At "Velocidad promedio de aire"
Re=(V_prom*D)/viscosidad "Numero de Reynolds - tubulento o laminar"
Long_in=10*D "Longitud de entrada"
NNu=0,023*(Re^0,8)*(Pr^0,3) "Numero de Nusselt, n de 0,3 para enfriamiento del fluido"
h=(k/D)*NNu "Coeficiente de transferencia de calor"
T_out=T_suelo-(T_suelo-T_in)*exp((-h*As)/(masico*Cp)) "Temperatura de salida del aire"
E=((T_in-T_out)/(T_in-T_suelo))*100 "Eficiencia"
"Perdida de presión"
Q=(masico*Cp*(T_out-T_in)) "Razon de transferencia de calor"
A=epsilon/D "Aspereza relativa"
1/sqrt(f)=-2*log10(((A)/3,7)+2,51/(Re*sqrt(f))) "Factor de friccion, ecuación de Colebrook"
P_dinamica=(rho*(V_prom^2))/2
dPliso=f*((L*rho*V_prom^2)/(D^2)) "perdida de presion por fricción"
hLliso=(dPliso/(rho*g)) "perdida de carga por fricción"
ktee=20*f "Coeficiente de perdida de carga por accesorio Tee"
kcodo=30*f "Coeficiente de perdida de carga por accesorio codo"
kin=0,78 "Coeficiente de perdida de carga por entrada"
kout=1 "Coeficiente de perdida de carga por salida"
dPacc=(kin+kout+(Codoso*kcodo)+(Tee*ktee))*P_dinamica "Perdida de presión por accesorios"
dPtotal=dPliso+dPacc "Perdidas de presión totales"
w=dPtotal*V_flujo "potencia requerida del ventilador"
W_ventilador=((V_prom)*At*dPtotal)/0,55 "potencia requerida del ventilador teniendo en cuenta su eficiencia"
W_td=(V_flujo*176)/0,5
COP=(1)/((T_in/T_out)-1)
EER=3,1412*COP
DT=T_out-T_suelo
```

Anexo 4 Resultados sensibilidad de malla configuración 1 y 2.

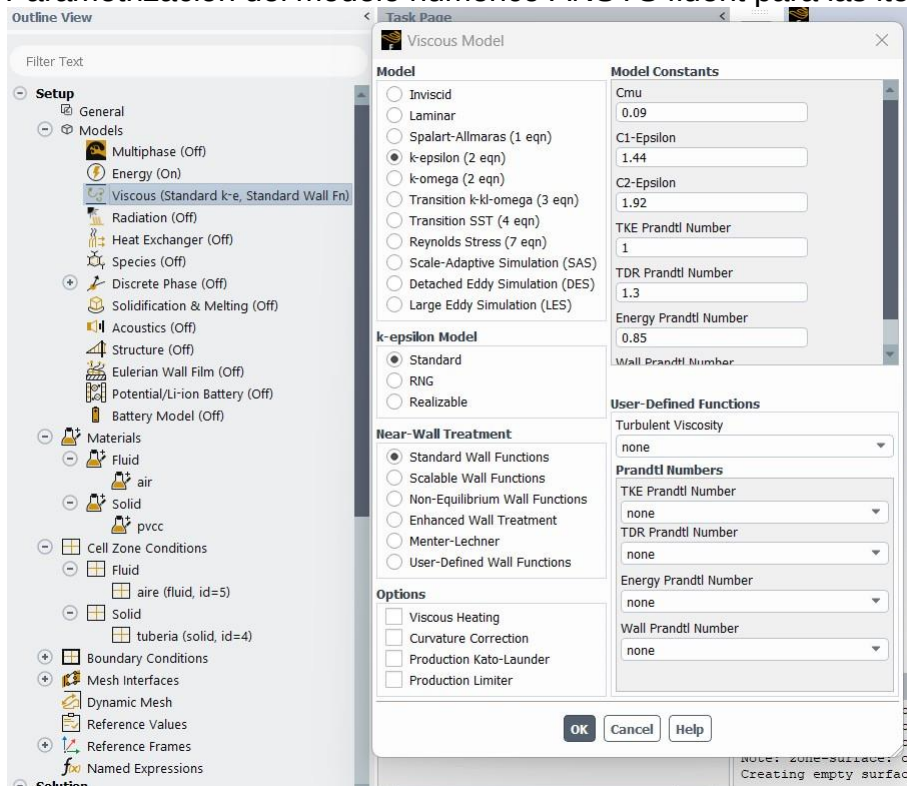
Mesh Element Size (m)	T_in-op (K)	T_out-op (K)	T_out-op (°C)	Mesh Nodes
0,2	304,7	297,72	24,57	229.965
0,1	304,7	297,72	24,57	229.965
0,08	304,7	297,72	24,57	229.965
0,05	304,7	297,72	24,57	229.965
0,03	304,7	297,72	24,57	1.057.627
0,025	304,7	297,72	24,57	1.050.345
0,02	304,7	297,73	24,58	1.593.478
0,012	304,7	297,74	24,59	5.896.250
0,01	304,7	297,48	24,33	2.468.480

a) Sensibilidad de malla configuración 1.

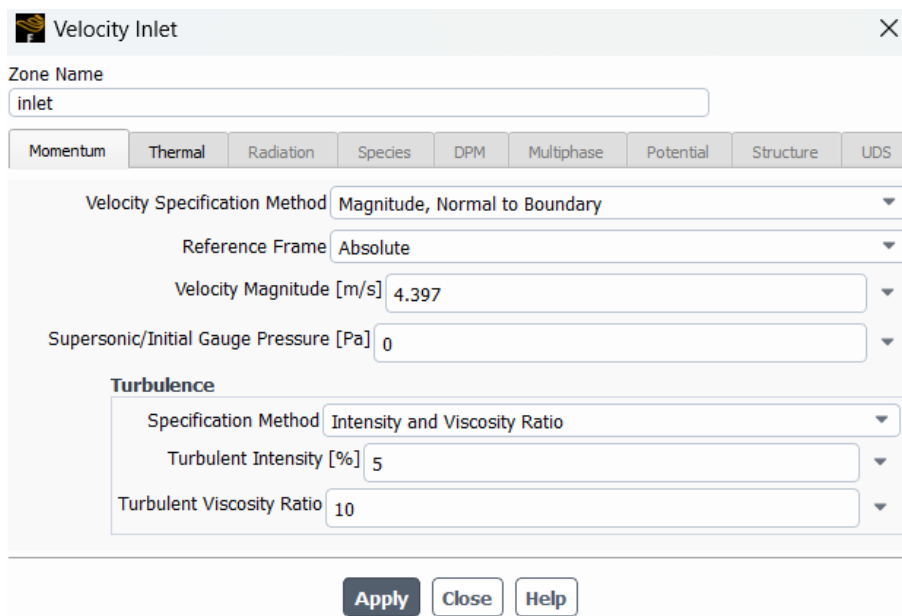
Mesh Element Size (m)	T_in-op (K)	T_out-op (K)	T_out-op (°C)	Mesh Nodes
0,2	304,7	300,07	26,92	207.334
0,1	304,7	300,07	26,92	207.271
0,08	304,7	300,07	26,92	207.327
0,05	304,7	300,08	26,93	207.286
0,03	304,7	300,08	26,93	207.287
0,025	304,7	300,06	26,91	209.329
0,02	304,7	300,10	26,95	313.204
0,015	304,7	300,10	26,95	585.836

b) Sensibilidad de malla configuración 2.

Anexo 5 Parametrización del modelo numérico ANSYS fluent para las iteraciones.



a) Se muestran las condiciones del modelo.

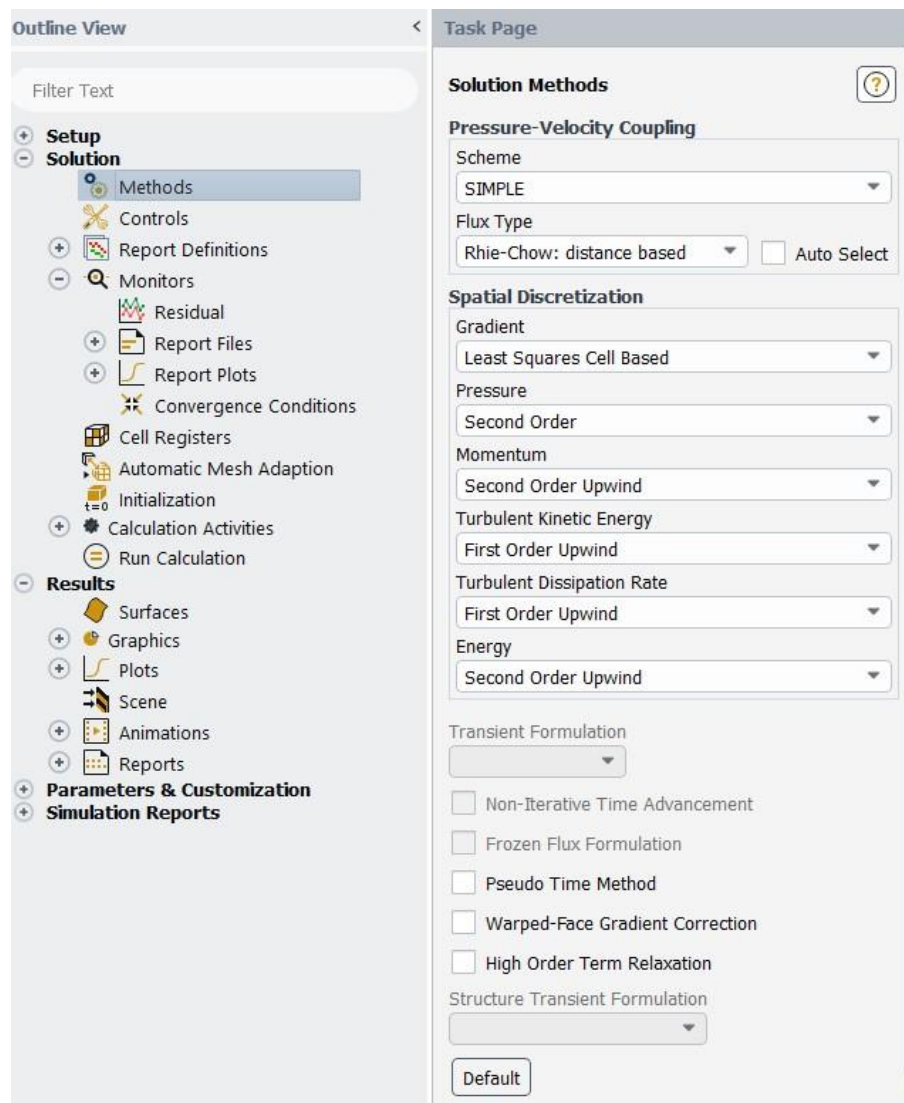


The screenshot shows the 'Velocity Inlet' dialog box. The 'Zone Name' is 'inlet'. The 'Thermal' tab is selected, showing a 'Temperature' of 31,55. The 'Momentum' tab is also visible. At the bottom are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons.

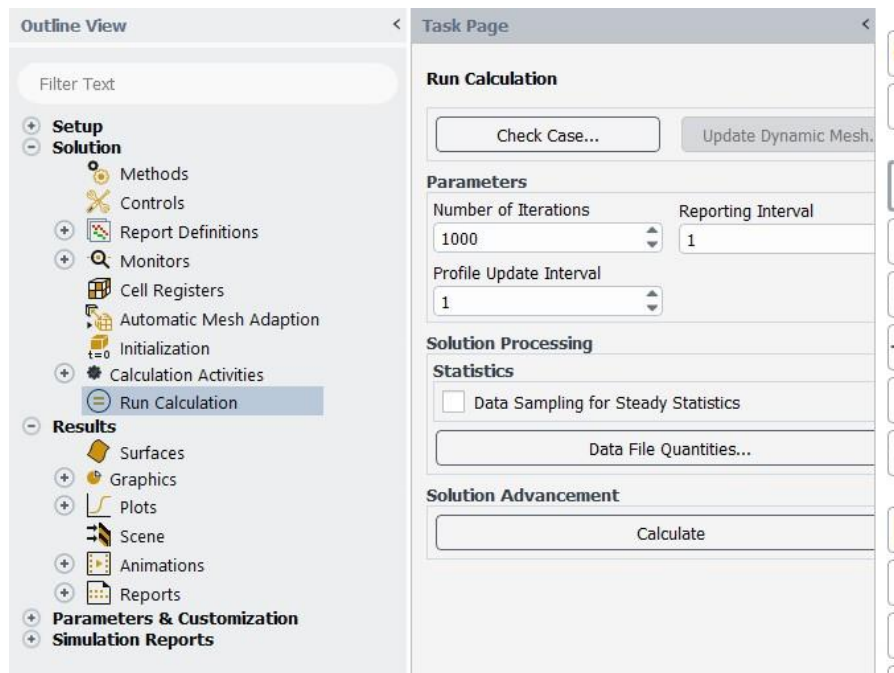
b) Condiciones de frontera a la entrada.

The screenshot shows the 'Wall' dialog box. The 'Zone Name' is 'wall-tuberia' and the 'Adjacent Cell Zone' is 'tuberia'. The 'Thermal' tab is selected, showing 'Thermal Conditions' with 'Temperature' set to 23,92. Other options like 'Heat Flux', 'Convection', and 'Radiation' are also visible. The 'Material Name' is 'pvc'. At the bottom are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons.

c) Condiciones de frontera en la tubería.

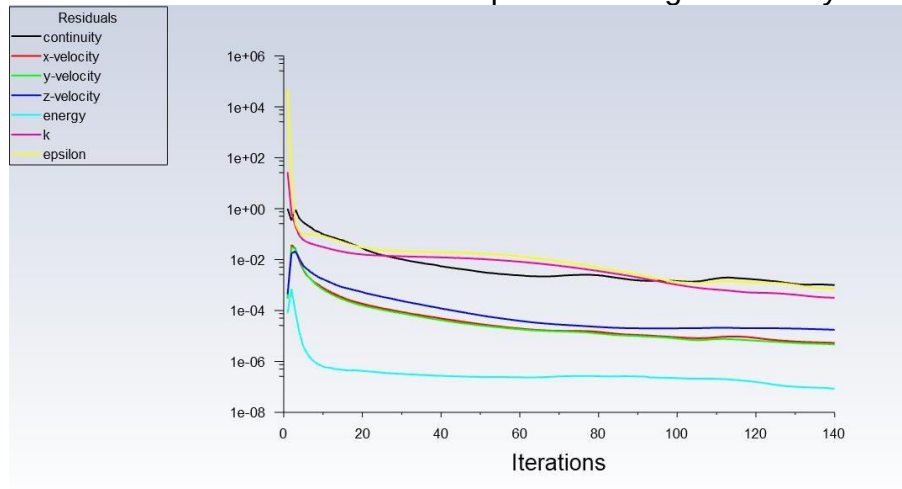


d) Método de solución.

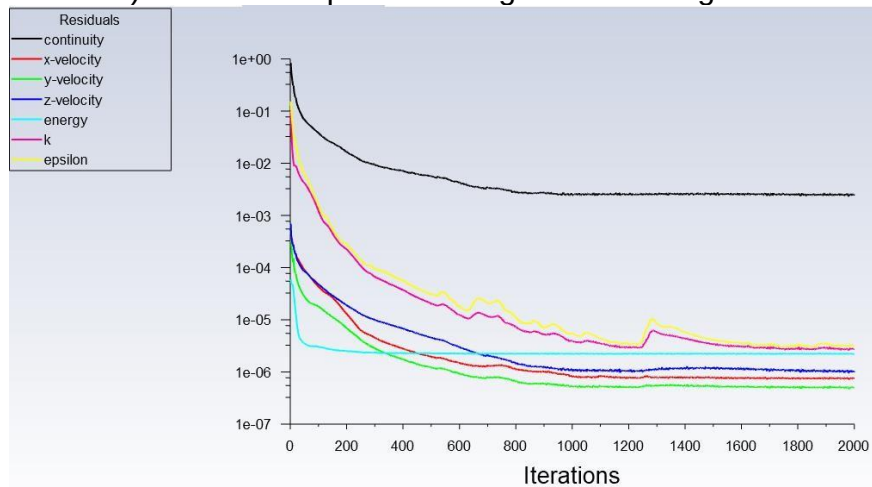


e) Iteraciones para solucionar.

Anexo 6 Grafica de residuales para la configuración 1 y 2.



a) Residuales para la configuración 1 longitud 30 m.



b) Residuales para la configuración 2 longitud 60 m.

Anexo 7 Ficha técnica ventiladores seleccionado.

SVE SVE/PLUS

60Hz

SVE SVE/PLUS

SVE: Extractores en línea para conductos, con bajo nivel sonoro montados dentro de una envoltura acústica

SVE/PLUS: Extractores en línea para conductos, con bajo nivel sonoro montados dentro de una envoltura acústica de 40 mm de aislante acústico fonoabsorbente



Tapa registro abatible, excepto modelos 100-125-150/L-160/L



SVE/PLUS

Ventilador:

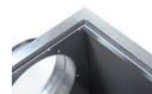
- Envoltura acústica recubierta de material fonoabsorbente
- Turbina con álabes a reacción excepto modelos 100-125-150-160-200/H, con turbina multipala.
- Bidas normalizadas en aspiración e impulsión, para facilitar la instalación en conductos
- Equipados con tapa registro abatible, excepto modelos 100-125-150/L-160/L
- Pies soporte integrados en la caja, que facilita su montaje
- Dirección aire sentido lineal

Motor:

- Motores de rotor exterior, con protector térmico incorporado, clase F, con rodamientos a bolas, protección IP54
- Monofásicos 220V 60Hz regulables
- Temperatura máxima del aire a transportar: + 50°C

Acabado:

- Anticorrosivo en chapa de acero galvanizada

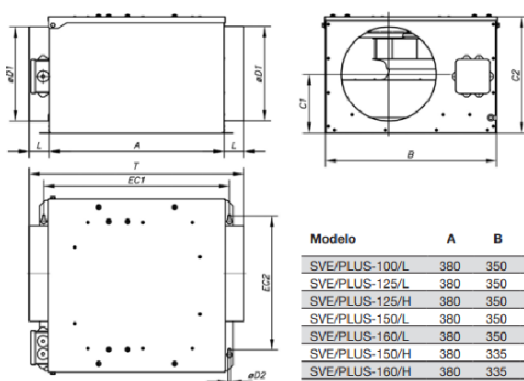


Aislante acústico de 40mm modelo SVE/PLUS

Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible 220V (A)	Potencia eléctrica máx. (kW)	Caudal máximo (m³/h)	Nivel sonoro irradiado dB(A)	Peso aprox. (Kg)	Tipo de turbina
SVE/PLUS-100/L	2160	0,45	0,10	290	28,35	9,0	Forward
SVE/PLUS-125/H	2808	0,75	0,18	370	39,90	9,5	Forward
SVE/PLUS-125/L	2160	0,45	0,10	310	29,40	9,0	Forward
SVE/PLUS-150/H	2700	1,00	0,25	490	37,80	12,0	Forward
SVE/PLUS-150/L	2160	0,45	0,10	355	27,30	9,5	Forward
SVE/PLUS-160/H	2700	1,00	0,25	490	37,80	12,0	Forward
SVE/PLUS-160/L	2160	0,45	0,10	355	27,30	9,5	Forward
SVE/PLUS-200/H	1680	0,75	0,18	760	39,90	16,5	Forward
SVE/PLUS-200/L	3180	0,70	0,18	640	38,85	13,5	Backward
SVE/PLUS-250/H	2880	0,75	0,18	1140	46,20	15,0	Backward
SVE/PLUS-250/L	3300	0,75	0,17	705	37,60	14,0	Backward
SVE/PLUS-315/H	1680	0,65	0,14	1315	43,05	23,0	Backward
SVE/PLUS-350/H	1680	0,85	0,20	1555	39,90	29,5	Backward
SVE/PLUS-400/H	1620	1,20	0,30	2310	43,05	33,0	Backward

SVE/PLUS



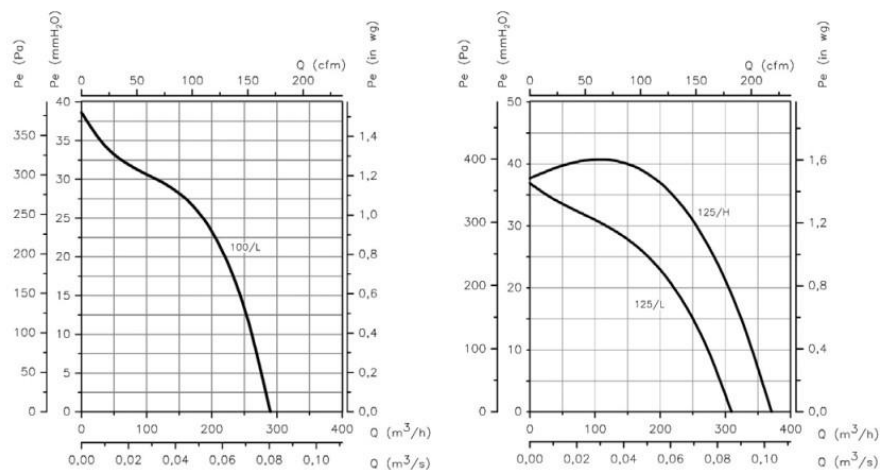
Modelo	A	B	C1	C2	øD1	L	øD2	EC1	EC2	T
SVE/PLUS-100/L	380	350	100	230	100	35	7	410	290	450
SVE/PLUS-125/L	380	350	100	230	125	35	7	410	290	450
SVE/PLUS-125/H	380	350	100	230	125	35	7	410	290	450
SVE/PLUS-150/L	380	350	110	230	150	35	7	410	290	450
SVE/PLUS-160/L	380	350	110	230	160	35	7	410	290	450
SVE/PLUS-150/H	380	335	165	265	150	37,5	7	405	265	455
SVE/PLUS-160/H	380	335	165	265	160	37,5	7	405	265	455
SVE/PLUS-200/L	460	450	162	285	200	37,5	7	490	380	535
SVE/PLUS-200/H	460	450	162	285	200	37,5	7	490	380	535
SVE/PLUS-250/L	460	450	156	310	250	52,5	7	490	380	565
SVE/PLUS-250/H	460	450	156	310	250	52,5	7	490	380	565
SVE/PLUS-315/H	565	540	210	390	315	57,5	9	595	440	680
SVE/PLUS-350/H	650	600	233,5	435	350	57,5	9	680	525	765
SVE/PLUS-400/H	650	680	263,5	500	400	77,5	9	680	600	805

Curvas características

Q= Caudal en m³/h, m³/s y cfm

Pe= Presión estática en mmH₂O, Pa e inwg.

SVE/PLUS



a) SVE/PLUS

NEOLINEO/V

Extractores en línea para conductos con cuerpo extraíble y tamaño reducido con rodamientos a bolas de Larga Duración



Ventilador:

- Envoltorio en material plástico autoextinguible V0
- Caja de bornes externa, con posición variable
- Instalación rápida y sencilla

Motor:

- Motores con rodamientos a bolas de Larga Duración, protección IPX4, de dos velocidades y regulables
- Monofásicos 110/120V. 60Hz o 220V 60Hz
- Temperatura de trabajo: -10°C +60°C

Acabado:

- En material plástico, de color blanco, autoextinguible al fuego V0

Código de pedido

NEOLINEO/V — 100 — (Q) — (T) — 1 — 60HZ

NEOLINEO/V: Extractores en línea para conductos con cuerpo extraíble

Diámetro boca en mm

Referencia con Q, nivel caudal bajo

Referencia con T, incorpora temporizador

1: Alimentación 110V 60Hz
2: Alimentación 220V 60Hz

Características técnicas

60Hz

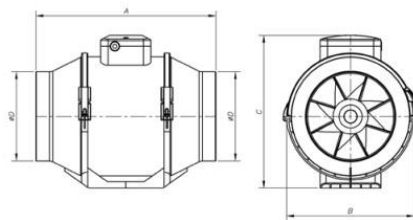
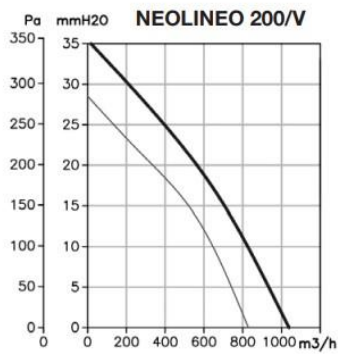
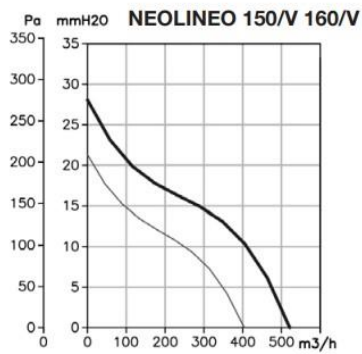
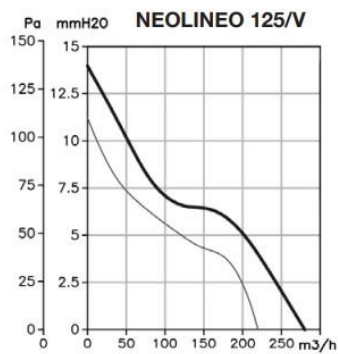
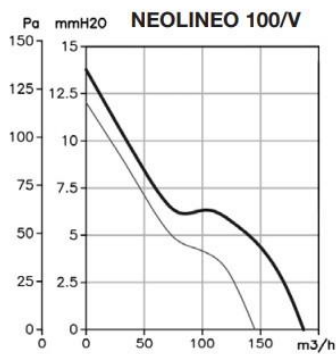
Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A) min/max	Potencia eléctrica máx. (kW) min/max	Caudal máximo (m ³ /h) min/max	Nivel sonoro irradiado* dB(A) min/max	Peso aprox. (Kg)
NEOLINEO 100/V	2180 / 2385	0,11 / 0,21	0,021 / 0,033	145 / 187	26 / 30	1,5
NEOLINEO 125/V	1950 / 2455	0,18 / 0,27	0,023 / 0,037	220 / 280	28 / 35	1,4
NEOLINEO 150/V	1680 / 2460	0,17 / 0,27	0,030 / 0,060	405 / 520	30 / 35	2,7
NEOLINEO 160/V	1680 / 2460	0,17 / 0,27	0,030 / 0,060	405 / 520	30 / 35	2,7
NEOLINEO 200/V	1915 / 2380	0,34 / 0,48	0,076 / 0,108	830 / 1040	32 / 38	4,0
NEOLINEO 250/V	1955 / 2440	0,54 / 0,79	0,125 / 0,177	1110 / 1400	45 / 55	7,8
NEOLINEO 315/V	1890 / 2430	1,00 / 1,42	0,230 / 0,320	1570 / 2050	49 / 58	11,9

*Los niveles de presión sonora irradiados, están obtenidos a 3 metros en campo libre, con tubos rígidos en aspiración y descarga.

Curvas características

Q= Caudal en m³/h

Pe= Presión estática en Pa



	A	B	C	øD
NEOLINEO 100/V	246	126	190	96
NEOLINEO 125/V	246	126	190	123
NEOLINEO 150/V	295	185	250	148
NEOLINEO 160/V	295	185	250	158
NEOLINEO 200/V	296	209	261	197
NEOLINEO 250/V	383	256	320	247
NEOLINEO 315/V	445	323	408	310

b) NEOLINEO/V

NEOSILENT



Extractores en línea para conductos de bajo nivel sonoro, con rodamientos a bolas de Larga duración

Ventilador:

- Envoltente en chapa de acero
- Aislado térmica y acústicamente con lana de roca
- Envoltente interior perforado para facilitar la absorción del ruido
- Caja de bornes externa
- Instalación rápida y sencilla

Motor:

- Motores con rodamientos a bolas de Larga Duración, protección IPX4, de dos velocidades
- Monofásicos 110-120V 60Hz o 220-240V 60Hz
- Temperatura de trabajo: -10°C +60°C

Acabado:

- Anticorrosivo en recubrimiento polimérico de color gris.

Código de pedido

NEOSILENT — 100 1 60Hz

Extractores en línea para conductos de bajo nivel sonoro, con rodamientos a bolas de Larga duración

Diámetro de la boca en mm

1: Alimentación 110V 60Hz
2: Alimentación 220V 60Hz

Características técnicas

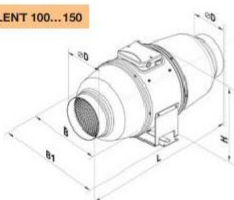
60Hz

Modelo	Velocidad (r/min) min / max	Intensidad máx. (A) min / max	Potencia eléctrica máx. (kW) min / max	Caudal máximo (m³/h) min / max	Nivel sonoro irradiado* (dBA) min / max	Peso aprox. (Kg)
NEOSILENT 100	2030 / 2630	0,10/0,11	0,024 / 0,026	170 / 240	24 / 29	4,6
NEOSILENT 125	1650 / 2310	0,11/0,13	0,025 / 0,030	230 / 340	23 / 28	4,6
NEOSILENT 150	1970 / 2645	0,20/0,23	0,045 / 0,052	405 / 555	26 / 33	6,1
NEOSILENT 200	2015 / 2445	0,35/0,49	0,078 / 0,110	810 / 1020	31 / 36	8,0
NEOSILENT 250	1965 / 2495	0,52/0,79	0,127 / 0,178	1050 / 1330	34 / 38	15,0
NEOSILENT 315	1975 / 2545	0,93/1,41	0,213 / 0,313	1530 / 1950	36 / 40	25,0

(*) Los niveles de presión sonora irradiados, están obtenidos a 3 metros en campo libre, con tubos rígidos en la aspiración y descarga.

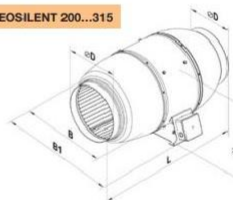
Dimensiones mm

NEOSILENT 100...150



Modelo	ØD	B	B1	L	H
NEOSILENT 100	98	215	243	505	237
NEOSILENT 125	123	215	243	474	237
NEOSILENT 150	147	247	274	580	260

NEOSILENT 200...315



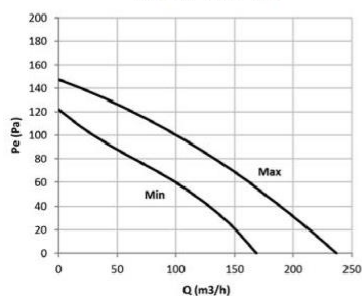
Modelo	ØD	B	B1	L	H
NEOSILENT 200	198	293	386	550	295
NEOSILENT 250	248	358	445	658	360
NEOSILENT 315	313	432	520	780	434

Curvas características

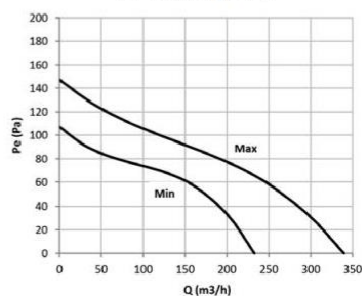
Q= Caudal en m³/h

Pe= Presión estática en Pa

NEOSILENT 100



NEOSILENT 125



c) NEOSILENT.

VENTILADORES HELICOCENTRÍFUGOS IN-LINE
Serie TD-MIXVENT



Configuración constructiva
modelos TD-160 a TD-800



Configuración constructiva
modelos TD-4000 y TD-6000



Configuración constructiva
modelos TD-1300 y TD-2000

Ventiladores helicocentrífugos de bajo perfil.
El cuerpo-motor es desmontable sin necesidad de tocar los conductos.
Fabricados en material plástico (modelos 160 a 2000) o en chapa de acero galvanizada protegida con pintura epoxi-poliéster anticorrosiva (modelos 4000 y 6000).

Motores

Modelos 160 a 2000:

IP44, Clase B, con rodamientos a bolas de engrase permanente y protector térmico.

Tensión de alimentación:

Monofásicos 230V-50Hz (modelos 160 a 350)

Monofásicos 230V-50/60Hz (modelos 500 a 2000)

Motores de 2 ó 3 velocidades, también regulables por variación de tensión.

Modelos 4000 a 6000:

IP54, Clase F, con rodamientos a bolas de engrase permanente y protector térmico.

Tensión de alimentación:

Monofásicos 230V-50/60Hz

Trifásicos 400V-50/60Hz
(modelo 4000) ó 400V-50Hz (modelo 6000)

Regulables por variación de tensión.

Otros datos

Los modelos trifásicos son regulables mediante convertidor de frecuencia.

Modelos TD-MIXVENT-T

Incorporan temporizador regulable entre 1 y 30 minutos.

Disponen de motor de 1 ó 3 velocidades, según modelo, no regulable.



Modelamiento numérico de un intercambiador de calor aire tierra para el enfriamiento de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Villavicencio.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS TD-MIXVENT

Es imprescindible comprobar que las características eléctricas [voltaje, intensidad, frecuencia, etc.] del motor que aparecen en la placa del mismo son compatibles con las de la instalación.

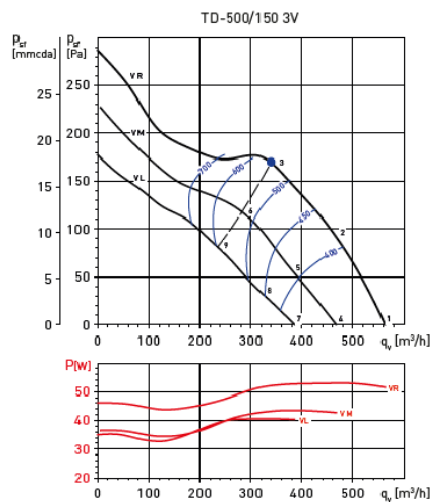
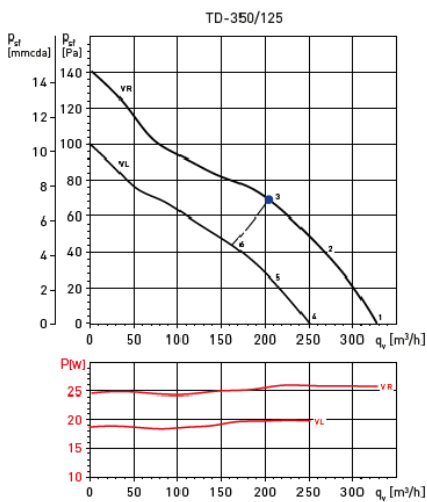
TD-MIXVENT	Velocidad (r.p.m.)	Potencia absorbida máxima (W)	Intensidad absorbida máxima (A)	Caudal en descarga libre (m³/h)	Nivel de presión sonora* (dB(A))	Temperatura de trabajo (°C)	Peso (kg)	Ø Conducto (mm)	Interruptor de 3 velocidades opcional	Regulador de tensión opcional
TD-160/100 N SILENT	2400	29	0,17	180	24	-20/+40	1,4	100	COM-2 REGUL-2	RMB-1,5 REB-1
	2200	18	0,11	150	22					
TD-250/100	2140	28	0,12	250	34	-20/+40	2	100	COM-2 REGUL-2	RMB-1,5 REB-1
	1700	22	0,1	200	28					
TD-350/125	2050	25	0,11	330	33	-20/+40	2	125	COM-2 REGUL-2	RMB-1,5 REB-1
	1590	20	0,09	250	28					
TD-500/150 3V	2590	53	0,21	560	35	-20/+60	2,7	150	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-1
	2150	44	0,19	470	31					
TD-500/160 3V	1820	41	0,18	390	26	-20/+60	2,7	160	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-1
	2590	53	0,21	560	35					
TD-800/200N 3V	2190	103	0,5	890	38	-20/+60	4,9	200	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-1
	1870	93	0,47	750	34					
TD-800/200 3V	1660	88	0,45	660	31	-20/+60	4,9	200	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-1
	2480	132	0,55	1.040	40					
TD-1300/250N 3V	2290	133	0,56	940	37	-20/+60	6,2	250	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-1
	2080	131	0,55	850	34					
TD-2000/315N 3V	2710	181	0,8	1.400	40	-20/+60	8,4	315	COM-3 INTER 4P	RMB-1,5 REB-2,5
	2520	153	0,6	1.310	39					
TD-4000/355	2290	132	0,5	1.180	37	-20/+60	19	355	-	RMB-3,5 REB-2,5
	2640	273	1,1	1.840	39					
TD-6000/400	2500	231	0,9	1.730	38	-40/+40	26	400	-	RMB-3,5 REB-5
	2290	200	0,8	1.620	37					
TRIFÁSICOS										
TD-4000/355 TRIF	1150	309	0,66	3.160	41	-40/+70	19	355	-	RMT-1,5 VFTM TRI 0,37
TD-6000/400 TRIF	1400	691	1,49	5.330	44	-40/+60	26	400	-	RMT-2,5 VFTM TRI 0,55

* Nivel de presión sonora, radiado a 3 metros en campo libre, con tubos rígidos en aspiración y descarga.

CURVAS CARACTERÍSTICAS

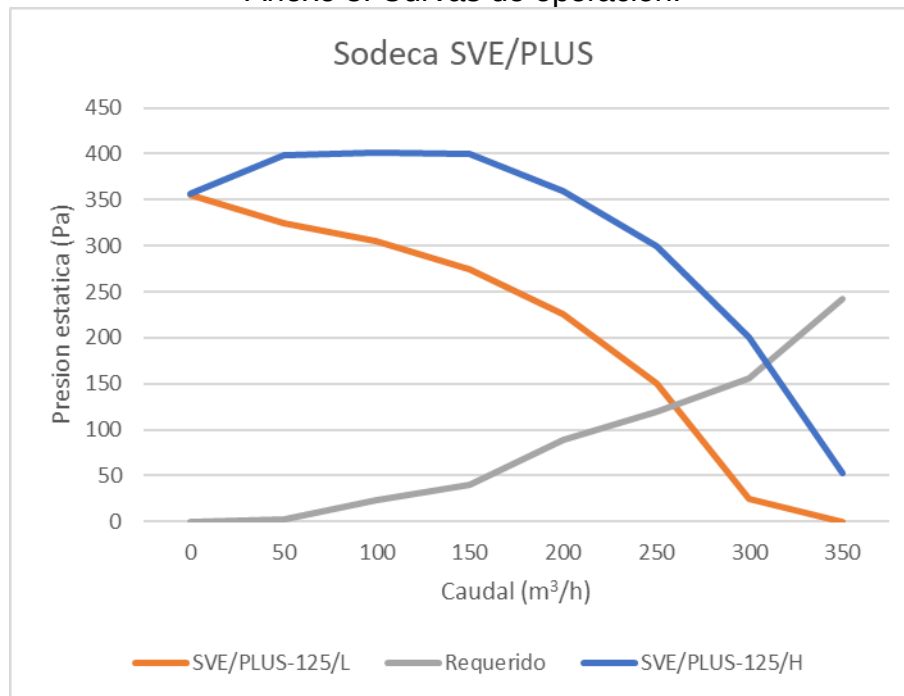
- q_v = Caudal en m³/h.
- p_{st} = Presión estática en mmcd y Pa.
- SFP: Factor específico de potencia, en W/m³/s (curvas azules).
- Aire seco normal a 20°C y 760 mmHg.
- Ensayos realizados de acuerdo a Norma ISO 5801 y AMCA 210-99.

VR: Velocidad Rápida
VM: Velocidad Media
VL: Velocidad Lenta

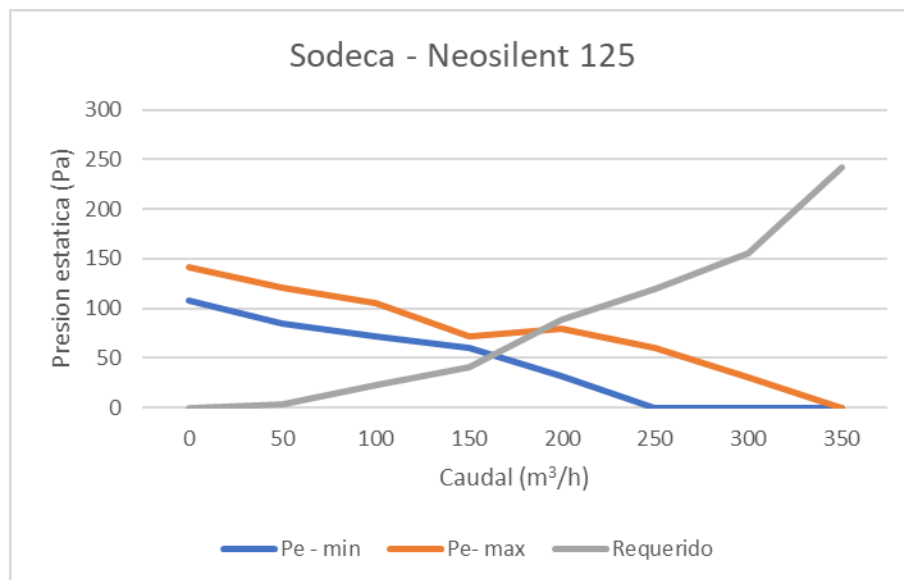


d) TD-MIXVENT

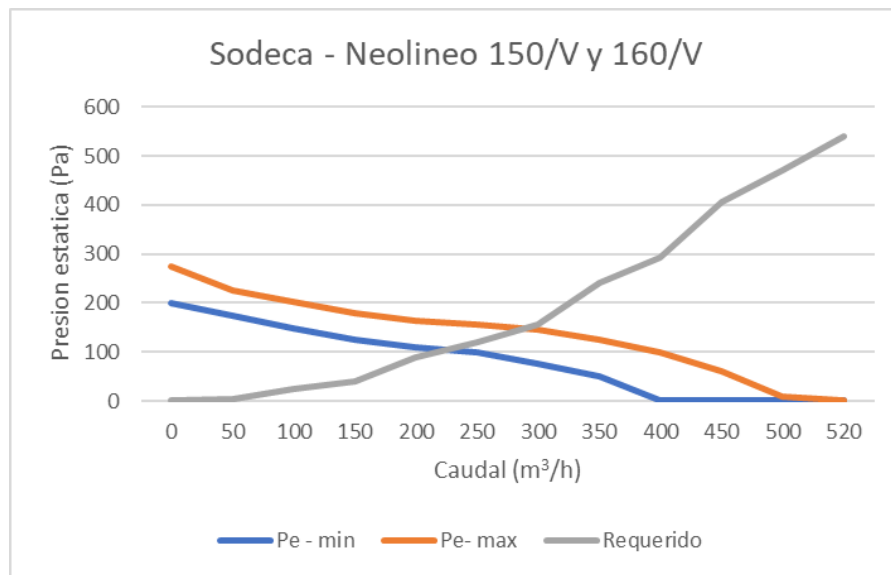
Anexo 8. Curvas de operación.



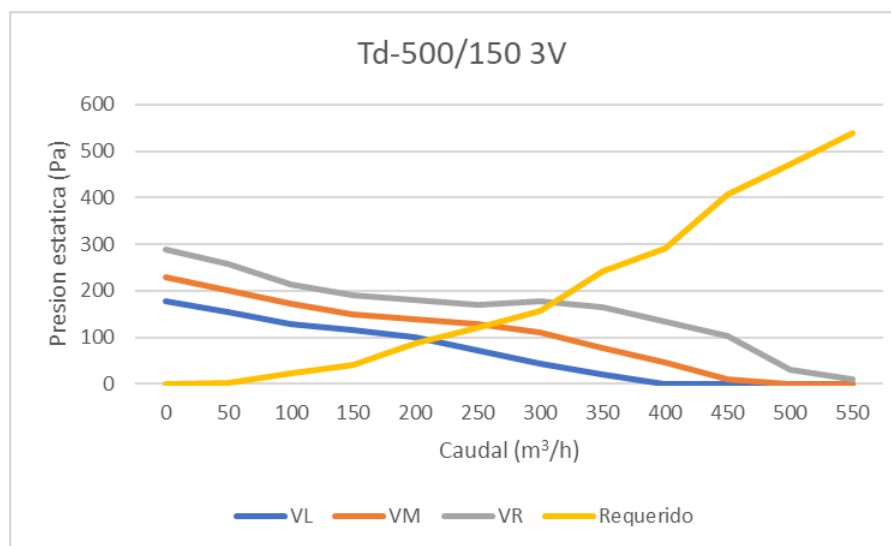
a) SVE/PLUS



b) Neosilent.



c) Neolineo.



d) TD mixvent.

Anexo 9 Costo Aires acondicionados seleccionados.

kttronix.com/aire-acondicionado-samsung-12000-btu-tipo-split-inverter-windfree220v-blanco-ar12cvfcmwk-cb/p/8806094786217

Inicio > Electrodomésticos > Grandes Electrodomésticos > Climatización > Aires Acondicionados

Aire acondicionado SAMSUNG 12.000 Btu Tipo Split inverter WindFree220V Blanco AR12CVFCMWK/CB

Código: 8806094786217

4.8 ★★★★★ | 13 opiniones

Envío gratis | Garantía 12 Meses



\$3.039.900
\$1.975.900 Hoy

\$1.875.900

Consultar vigencias >

Con este producto te llevas GRATIS:

Visita de Inspección para Instalación de Aire Acondicionado
Vigencia: Desde 13-07-2024 hasta el 26-07-2024
GRATIS Ver detalle del producto >

Envío a tu dirección GRATIS

Recoge en tienda GRATIS

Compra por WhatsApp

a) Sistema inverter 12000 BTU

kttronix.com/aire-acondicionado-challenger-18000btu-tipo-split-inverter-220v-blanco/p/7705191043555

Inicio > Electrodomésticos > Grandes Electrodomésticos > Climatización > Aires Acondicionados

Aire Acondicionado CHALLENGER 18.000Btu Tipo Split Inverter 220V Blanco

Código: 7705191043555

★★★★★ 0 opiniones

Envío gratis | Garantía 12 Meses



\$2.259.900 Hoy

Envío a tu dirección GRATIS

Recoge en tienda GRATIS

Puedes recibir tu pedido AL DÍA SIGUIENTE. Conoce el tiempo exacto, una vez confirmes tu dirección de entrega.

Cantidad: 1

Agregar al carrito

Extiende la garantía y protege tu producto contra daño accidental

Compra por WhatsApp

b) Sistema inverter 18000 BTU