



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CON
GEOTERMIA EN VIVIENDAS DE HONDURAS**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN ENERGÍA**

PRESENTADO POR:

41741010 GEORGINA ISABEL LACAYO SUAZO

ASESOR METODOLÓGICO: ING. RAFAEL AGUILAR

ASESOR TEMÁTICO: ING. ANA AMAYA

CAMPUS TEGUCIGALPA; ABRIL, 2021

Para mis padres, quienes confían en mí en lo que sea que me proponga.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Ana Amaya, Ingeniera Mecánica docente de UNITEC y UNAH, por aportar sus conocimientos y experiencia para guiarme en el desarrollo del proyecto de investigación, de manera que nunca me desviase de mis propios objetivos.

También quiero agradecer a UNITEC, en especial al cuerpo docente de la carrera de Ingeniería en Energía y al asesor metodológico, el Ingeniero Rafael Aguilar, por brindarme las herramientas y la instrucción para desarrollar el proyecto de investigación de manera efectiva y con los estándares tecnológicos y académicos característicos de la institución.

Más que nada le debo una inmensa gratitud a Dios y a mi familia, quienes me apoyan aún en los momentos más difíciles, otorgándome el tiempo, el espacio y los recursos para que pudiera finalizar mi proyecto de graduación.

*Es muy vasto el potencial de energía geotérmica que poseemos en la
tierra, justo debajo de nuestros pies.*

David K. Garman

RESUMEN EJECUTIVO

Se identificó una oportunidad de investigación sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía en sistemas de climatización para viviendas en Honduras. Mediante un estudio técnico, se evaluó la factibilidad de implementar un sistema de climatización geotérmico en las ciudades de Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba. Para demostrar la rentabilidad del proyecto, se planteó un estudio financiero que determinó el costo de inversión inicial y el periodo de retorno de capital.

Se encontró que las condiciones exteriores en San Pedro Sula y La Ceiba representan una mayor factibilidad que en Tegucigalpa. Con el método de factores ponderados se determinó que el sistema de climatización geotérmico ideal para implementación en Honduras se compone de un bucle exterior cerrado vertical, un bucle interior fan coils y una bomba de calor reversible de alto rendimiento. A pesar de tener un costo de inversión inicial más elevado que los sistemas convencionales, el sistema de climatización geotérmico tiene el menor costo de operación y mantenimiento, la mayor vida útil, y los mejores rendimientos en la tecnología disponible. El análisis financiero demostró que el componente con mayor peso en la inversión inicial es la bomba de calor geotérmica y de segundo está el sistema cerrado vertical del bucle exterior. Se estimó que el proyecto de implementación de un sistema de climatización geotérmica puede ejecutarse en dos meses, y que en siete años se vería el retorno del capital.

La investigación determinó que un proyecto de climatización con geotermia de muy baja entalpía en Honduras es técnica y económicamente factible, volviéndose una opción de inversión en el desarrollo sostenible de nuevas tecnologías renovables.

Palabras clave: geotermia, climatización, energía renovable.

ABSTRACT

A research opportunity was identified on the use of very low enthalpy geothermal energy in HVAC systems for homes in Honduras. Through a technical study, the feasibility of implementing a geothermal air conditioning system in the cities of Tegucigalpa, San Pedro Sula and La Ceiba was evaluated. To demonstrate the profitability of the project, a financial study was proposed that determined the initial investment cost and the period of return of capital.

It was found that the external conditions in San Pedro Sula and La Ceiba represent a greater feasibility than in Tegucigalpa. The weighted factors method helped determine that the ideal geothermal air conditioning system for implementation in Honduras consists of a vertical closed outer loop, an inner fan coil loop, and a high-performance reversible heat pump. Despite having a higher initial investment cost than conventional systems, the geothermal air conditioning system has the lowest cost of operation and maintenance, the longest lifespan, and the best returns in the available technology. The financial analysis showed that the component with the greatest weight in the initial investment is the geothermal heat pump and second is the closed vertical system of the outer loop. It was estimated that the implementation of a geothermal air conditioning system can be executed in two months, and that in seven years the return of capital would be seen.

The research determined that a very low enthalpy geothermal air conditioning project in Honduras is technically and economically feasible, becoming an investment option in the sustainable development of new renewable technologies.

Keywords: geothermal, air conditioning, renewable energy.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
II.	Planteamiento del problema.....	3
2.1	Precedentes del problema	3
2.2	Definición del problema.....	3
2.3	Justificación.....	4
2.4	Preguntas de investigación.....	5
2.5	Objetivos.....	5
2.5.1	Objetivo general	5
2.5.2	Objetivos específicos.....	5
III.	Marco Teórico.....	7
3.1	Energía geotérmica.....	7
3.1.1	Geotermia en Honduras.....	9
3.1.2	Clasificación de la energía geotérmica.....	10
3.1.3	Usos Directos	11
3.2	Condiciones meteorológicas y geológicas en Honduras.....	12
3.2.1	Clima.....	12
3.2.2	Temperaturas	13
3.2.3	Suelos.....	14
3.2.4	Hidrogeología.....	15
3.3	Sistemas de climatización.....	16
3.3.1	Sistemas convencionales	16
3.3.2	Bombas de calor	17

3.3.3	Pozos provenzales.....	19
3.4	Bombas geotérmicas.....	20
3.4.1	Condiciones exteriores	21
3.4.2	Condiciones interiores.....	23
3.4.3	Tipos de sistemas geotérmicos.....	23
3.4.4	Fluidos de trabajo.....	25
3.4.5	Rendimiento	26
3.4.6	Costos de inversión.....	26
3.5	Empresas de servicios energéticos.....	27
3.5.1	Estado del mercado en Honduras.....	28
3.5.2	Legislación.....	29
IV.	Metodología.....	30
4.1	Enfoque	30
4.2	Variables de investigación.....	30
4.3	Técnicas e instrumentos aplicados	30
4.4	Metodología de estudio.....	31
4.5	Cronograma de actividades.....	31
V.	Resultados y Análisis.....	32
5.1	Sistema de climatización geotérmico	32
5.1.1	Funcionamiento	32
5.1.2	Componentes.....	33
5.1.2.1	Bomba de calor geotérmica.....	33
5.1.2.2	Bucle exterior.....	34

5.1.2.3	Bucle interior.....	34
5.1.2.4	Refrigerante.....	36
5.2	Condiciones de diseño	36
5.3	Diseño del sistema de climatización geotérmico.....	37
5.3.1	Tamaño del proyecto	37
5.3.2	Localización del proyecto.....	37
5.3.3	Ingeniería del proyecto	38
5.4	Geotermia vs. Convencional.....	40
5.4.1	Costo de inversión inicial.....	40
5.4.2	Costos de O&M.....	41
5.4.3	Vida útil	41
5.4.4	Rendimiento	42
5.5	Análisis financiero.....	43
5.5.1	Presupuesto de inversión	44
5.5.2	Determinación de costos.....	46
5.5.2.1	Costos de O&M.....	46
5.5.2.2	Costos financieros.....	46
5.5.3	Cronograma de ejecución.....	47
5.5.4	Periodo de retorno de capital.....	47
VI.	Conclusiones	49
VII.	Recomendaciones.....	51
VIII.	Aplicabilidad.....	52
IX.	Evolución de trabajo actual	53

Bibliografía.....	54
Anexos.....	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura interna de la Tierra	7
Ilustración 2. Esquema de la corteza terrestre continental	8
Ilustración 3. Mapa de Honduras que ubica las manifestaciones geotérmicas	9
Ilustración 4. Porcentaje de usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial.....	12
Ilustración 5(a). Mapa del Valle de Sula de temperatura media anual	13
Ilustración 6. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor.....	18
Ilustración 7. Pozo provenzal.....	19
Ilustración 8. Modos de funcionamiento de una bomba de calor.....	21
Ilustración 9. Perfil de temperatura vertical del suelo a lo largo de un año.....	22
Ilustración 10. Tipos de sistemas con bombas de calor geotérmicas.....	24
Ilustración 11. Ciclo de funcionamiento de sistema de climatización geotérmico.....	32
Ilustración 12. Bomba de calor geotérmica	33
Ilustración 13. Tubería de polietileno	34
Ilustración 14. Suelo radiante	34
Ilustración 15. Radiador de baja temperatura.....	35
Ilustración 16. Fan coils.....	35
Ilustración 17. Refrigerante R410A.....	36
Ilustración 18. Diagrama del proceso de implementación.....	38
Ilustración 19. Inversión inicial por tipo de sistema de climatización.....	40

Ilustración 20. Costo de mantenimiento por tipo de sistema de climatización	41
Ilustración 21. Vida útil por tipo de sistema de climatización	42
Ilustración 22. Ranking en rendimiento de diferentes sistemas de clasificación.....	42
Ilustración 23. COP ante cambio de temperatura	43
Ilustración 24. Porcentaje del presupuesto por componente.....	45
Ilustración 25. Flujo de fondos de proyecto	48
Ilustración 26. Diagrama P-h ciclo de refrigeración por compresión de vapor	60
Ilustración 27. Bomba geotérmica TERRA iPUMP T	62
Ilustración 28. Bomba geotérmica geoTHERM.....	63
Ilustración 29. Bomba geotérmica Clsius Classic.....	63
Ilustración 30. Bomba geotérmica ecoGEO	64
Ilustración 31. Bomba geotérmica NIBE F1155.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la energía geotérmica	10
Tabla 2. Principales características de tipos de suelos comunes	22
Tabla 3. Cronograma de actividades	31
Tabla 4. Condiciones de diseño según la ubicación.....	36
Tabla 5. Ubicación óptima de proyecto.....	37
Tabla 6. Selección de bucle exterior.....	39
Tabla 7. Selección de bucle interior	39
Tabla 8. Precios unitarios de diferentes componentes.....	44
Tabla 9. Presupuesto de inversión de sistema de climatización geotérmico.....	45

Tabla 10. Costos de O&M de sistema de climatización geotérmico.....	46
Tabla 11. Cronograma de ejecución de proyecto.....	47
Tabla 12. Escala de ponderación para ubicación de proyecto.....	67
Tabla 13. Escala de ponderación para bucle exterior.....	67
Tabla 14. Escala de ponderación para bucle interior.....	67
Tabla 15. Cotización sistema vertical.....	68
Tabla 16. Cotización sistema horizontal.....	69
Tabla 17. Cotización suelo radiante.....	70
Tabla 18. Cotización fan coils.....	71
Tabla 19. Cotización radiador.....	72
Tabla 20. Cotización bomba de calor geotérmica.....	73
Tabla 21. Cotización refrigerante.....	74
Tabla 22. Cotización tubería.....	75
Tabla 23. Flujo de fondos.....	76

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Carga térmica de un espacio.....	23
Ecuación 2. COP en modo calefacción.....	26
Ecuación 3. COP en modo refrigeración.....	26
Ecuación 4. Principio de conservación de la energía.....	60
Ecuación 5. Sistema de ciclo cerrado.....	60
Ecuación 6. Potencia del compresor.....	60
Ecuación 7. Calor absorbido en el evaporador.....	60

Ecuación 8. Calor liberado en el condensador.....	61
Ecuación 9. Carga térmica total.....	65
Ecuación 10. Cargas por transmisión.....	65
Ecuación 11. Cargas por ventilación e infiltración.....	65
Ecuación 12. Cargas por ganancias solares.....	65
Ecuación 13. Cargas internas.....	65
Ecuación 14. Longitud de tubería.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. COP con ciclo termodinámico.....	60
Anexo 2. Algunos fabricantes.....	62
Anexo 3. Cálculos del sistema.....	65
Anexo 4. Escalas de ponderación tabla 5, 6 y 7.....	67
Anexo 5. Desglose de precios unitarios.....	68
Anexo 6. Flujo de fondos.....	76

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

ACS Agua caliente sanitaria

COP Coeficiente de rendimiento (en inglés, Coefficient Of Performance)

ESE Empresa de Servicios Energéticos

GEI Gases de efecto invernadero

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

Capacidad térmica volumétrica: cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 m^3 de terreno en 1 K .

Climatización: acondicionamiento de un espacio de manera que la temperatura de confort térmico sea estable durante todo el año sin importar la estación.

Conductividad térmica: flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de 1 K/m .

Confort humano: equilibrio delicado de sensaciones placenteras del cuerpo producidas por su entorno.

Convección: transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento.

Entropía: medida del desorden de un sistema.

Permeabilidad: capacidad de un suelo o roca para ser atravesado por el agua.

Termodinámica: ciencia que trata sobre todo con la energía.

Transmisividad: capacidad de un manto poroso para dejar fluir una corriente de agua a su través.

I. INTRODUCCIÓN

La Tierra ha demostrado su capacidad de suplir las necesidades de la humanidad desde el principio de los tiempos, asimismo, los seres humanos han logrado desarrollar las tecnologías requeridas para el aprovechamiento de los recursos naturales. No obstante, el ingenio del hombre primitivo permitió que la energía geotérmica hiciera su debut desde muy temprano. A lo largo de toda la historia está presente el aprovechamiento de la energía geotérmica, desde la elección de cuevas como refugio de las condiciones climáticas extremas y la utilización de aguas termales para la cocción de alimentos, hasta los sistemas de calefacción urbana y las tradicionales termas de las antiguas civilizaciones China, Romana y Otomana (Stober & Bucher, 2013).

Desde entonces se han desarrollado diferentes tecnologías que aprovechan la geotermia, que es el calor de la tierra, incluyendo el acondicionamiento del aire. Específicamente, la tecnología que se estudiará es la bomba de calor geotérmica, la cual permite la extracción de calor de la tierra para calefacción o introducción de calor a la tierra para refrigeración, mediante un sistema de intercambio de calor basado en el principio de convección. Es posible implementar este tipo de sistema geotérmico en cualquier lugar de la superficie terrestre, ya que se basa en la capacidad del subsuelo de almacenar calor y mantener su temperatura casi constante durante todo el año. Este tipo de energía geotérmica se clasifica como de muy baja entalpía, o muy baja temperatura. Más aún, esta energía renovable, a diferencia del resto, no depende de la energía solar, sino de sus características intrínsecas.

Debido al clima tropical del país es muy común que las personas inviertan en la instalación de sistemas de aire acondicionado en sus casas para asegurar el confort térmico durante todos los días del año, incurriendo en altos gastos en consumo energético. La implementación de una bomba de calor para el acondicionamiento de una edificación tiene un importante potencial de desarrollo en el mercado de proyectos con energías renovables en el país. Sobre las bombas geotérmicas, Glassley (2015) afirma: "Proporcionan el método ideal para satisfacer las demandas de energía para la calefacción y refrigeración de edificios y espacios" (pág. 233).

Este proyecto de investigación determinará la viabilidad, es decir, la factibilidad técnica y económica, de la implementación de un sistema de climatización con bomba de calor reversible que aprovecha la energía geotérmica de muy baja entalpía en una vivienda ubicada en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba. El análisis que se realizará servirá de referencia para la introducción de una nueva tecnología renovable al mercado de inversión en Honduras en el marco de una era de sostenibilidad, eficiencia energética y desarrollo tecnológico.

El informe se compondrá de ocho partes, comenzando por una amplia descripción del problema y los objetivos del proyecto. Luego se detallará el marco teórico correspondiente a cinco temas fundamentales: energía geotérmica, condiciones meteorológicas y geológicas, sistemas de climatización, bombas de calor geotérmicas, y empresas de servicios energéticos. Se describirá la metodología empleada en el análisis. A partir del estudio técnico y financiero realizado, se presentarán las conclusiones y las recomendaciones del trabajo. Por último, se explicará la importancia del proyecto mediante una descripción de su aplicabilidad, y cómo el trabajo puede continuarse en un futuro.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

Los efectos del cambio climático en la vida cotidiana se viven cada vez más evidentemente, con inviernos más fríos y veranos más calientes. En un clima tropical como lo hay en Honduras el verano prevalece la mayor parte del año, induciendo a las personas a adquirir sistemas de acondicionamiento para refrigerar sus hogares, lo cual significa un mayor consumo de energía eléctrica. Una gran cantidad de recursos se destinan a la climatización de espacios con el objetivo de asegurar el confort humano, y a pesar de la constante innovación en las tecnologías destinadas a este propósito en cuanto a eficiencia energética y costo, la dependencia en los sistemas de acondicionamiento convencionales no garantizan la sostenibilidad.

Desde el principio de la historia humana se ha utilizado la energía proveniente de la tierra para mantener espacios frescos en tiempos áridos y abrigados en los gélidos. Para aprovechar la energía geotérmica se han desarrollado tecnologías que utilizan como fuente de energía el calor de la tierra; una de estas tecnologías son las bombas de calor geotérmicas reversibles. Actualmente las bombas geotérmicas se utilizan en 58 países, siendo los cinco principales: China, Estados Unidos, Suecia, Alemania y Finlandia (Lund & Toth, 2021).

Un sistema de acondicionamiento de aire con una bomba geotérmica es capaz de calentar un espacio cuando la temperatura ambiente es baja y refrigerarlo cuando es alta; su versatilidad lo hace ideal para su implementación en prácticamente cualquier lugar del planeta donde exista suelo firme. El mayor beneficio de utilizar un sistema de climatización geotérmico se manifiesta en la utilización de una fuente de energía renovable que no emite gases de efecto invernadero (GEI).

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La implementación de nuevas tecnologías renovables en Honduras constituye un paso importante hacia un sector de energía más sostenible. Por esta razón, es ventajoso evaluar las posibilidades de introducir al mercado del sector residencial un sistema de climatización que utilice la geotermia

de muy baja entalpía, que provea a la población una opción más sostenible para lograr el confort en sus hogares. La factibilidad de la implementación del sistema de climatización geotérmico depende de las condiciones exteriores preexistentes, como la temperatura ambiente, y las condiciones interiores particulares de la vivienda. Una motivación determinante la define el ahorro de energía destinada al acondicionamiento de aire de una vivienda implicado por la utilización de una bomba geotérmica.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Ahora más que nunca, cuando el mundo entero está enfrentándose a una batalla climatológica, es vital transformar los procesos que consumen combustibles fósiles de manera que sus fuentes de energía sean limpias y renovables en todos los sectores. Específicamente en el sector residencial, que es el mayor consumidor de energía en Honduras, existe un sinnúmero de oportunidades de desarrollo de proyectos verdes que impulsan hacia la sostenibilidad conforme a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En Honduras se encuentra un gran potencial de desarrollo de recursos renovables, de los cuales una considerable porción son geotérmicos, tanto para la generación de energía eléctrica como para uso directo. Más aún, los usos directos de la energía geotérmica se enfocan en los sectores industrial, comercial y residencial, cuyo aprovechamiento supone de pocas limitaciones. Dentro de estos usos está la climatización con geotermia, un aspecto que no se ha desplegado en el mercado como un modelo de negocios rentable. Las empresas de servicios energéticos (ESE) en el país pueden fortalecer la economía, ofreciendo una solución diferente a las necesidades de las personas que les permita tener un estilo de vida más ecológico, un consumo energético más eficiente y una inversión beneficiosa.

Es aquí donde entra el estudio de viabilidad de la implementación de un sistema de climatización geotérmico, de tal manera que en un futuro cercano una familia disponga de opciones de inversión para proyectos renovables a implementar en sus hogares, adicionando a los sistemas de energía solar fotovoltaicos o termo solares, los aerogeneradores, que aprovechan la energía eólica, y los biodigestores, que producen biogás.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cómo funciona una bomba de calor geotérmica reversible para refrigerar en verano y calentar en invierno?
2. ¿Son las condiciones exteriores de temperatura, humedad y suelo en las tres ciudades principales de Honduras oportunas para la implementación de un sistema de climatización geotérmico?
3. ¿Es técnicamente factible implementar un sistema de climatización geotérmico según la ubicación de la vivienda?
4. ¿Qué ventajas brinda un sistema de climatización geotérmico sobre los sistemas de acondicionamiento de aire convencionales?
5. ¿Es económicamente factible implementar un sistema de climatización geotérmico en una vivienda?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad de implementación de un sistema de climatización para una vivienda en Honduras con geotermia de muy baja entalpía usando una bomba de calor reversible.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Explicar el funcionamiento y los componentes de un sistema de climatización con geotermia de muy baja entalpía usando una bomba de calor reversible.
2. Analizar los datos sobre las condiciones meteorológicas y geológicas en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba.
3. Diseñar un sistema de climatización geotérmico de muy baja entalpía para las condiciones meteorológicas y geológicas respectivas en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba.
4. Comparar el sistema de climatización geotérmico con un sistema de acondicionamiento de aire convencional.

5. Determinar si el costo de inversión inicial del sistema de climatización geotérmico implementado en una vivienda es económicamente factible.

III. MARCO TEÓRICO

La base de este estudio es el aprovechamiento de la energía geotérmica. Por esta razón, se vuelve relevante exponer cuál es su potencial en Honduras y cuáles son las diferentes maneras en las que se puede aprovechar. Conocer las condiciones meteorológicas y geológicas en el país es necesario para determinar el tipo de sistema de climatización con bomba de calor geotérmica adecuado a un sitio específico; además, se requiere la comprensión técnica de su funcionamiento. Abordando el aspecto económico del análisis, se comenta el costo de inversión inicial implicado por la implementación de este proyecto y la legislación correspondiente.

3.1 ENERGÍA GEOTÉRMICA

La geotermia es una rama de la geología que estudia las diferencias de temperaturas de la corteza terrestre y los fenómenos naturales ocasionados por la distribución de los flujos térmicos. La energía geotérmica es el calor, una forma de energía, generado en el interior del planeta Tierra de manera activa, como en la ilustración 1; puede ser aprovechada mediante diversas tecnologías dependiendo del tipo de manifestación geotérmica. El calor de la Tierra se origina en su centro y se transmite por conducción a través de las diferentes capas terrestres. (Pesce, 1994)

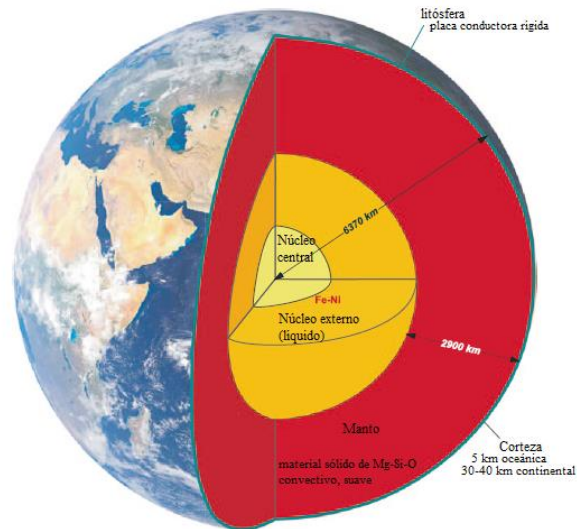


Ilustración 1. Estructura interna de la Tierra

Fuente: (Stober & Bucher, 2013)

Aproximadamente el 60% del calor de la corteza terrestre se deriva de la desintegración radioactiva de los elementos potasio (K), rubidio (Rb), torio (Th), y uranio (U), debido a que ahí se encuentra el reservorio de elementos radiactivos más grande (Glassley, 2015). En la ilustración 2 se muestra una sección transversal esquemática de la corteza continental con los rangos de espesor de sus segmentos junto con una línea isotérmica hipotética, indicativa de la variabilidad de la distribución de calor.

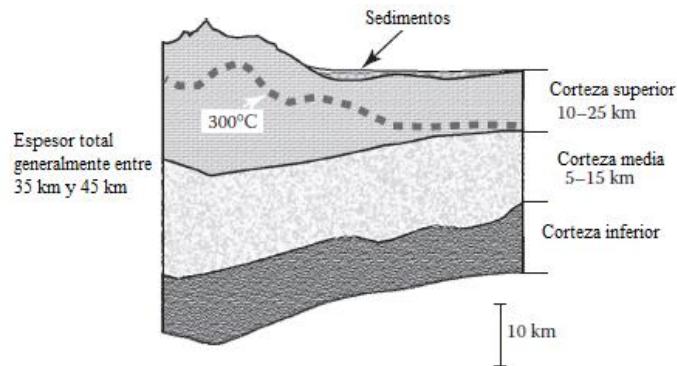


Ilustración 2. Esquema de la corteza terrestre continental

Fuente: (Glassley, 2015)

La temperatura de la corteza terrestre aumenta en función de la profundidad, definiéndose el gradiente geotérmico en 33 °C/km (Pesce, 1994). Dickson y Fanelli (2004) consideran que el gradiente geotérmico promedio se encuentra dentro del rango de 25 a 30 °C/km. En la mayoría de los casos, la temperatura dentro de los primeros 10 a 20 m bajo la superficie corresponde a la temperatura ambiente media anual del sitio (Stober & Bucher, 2013).

Un sistema geotérmico consiste en tres elementos fundamentales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido. La fuente de calor se obtiene de la Tierra y se puede caracterizar por ser un recurso renovable. El reservorio se compone de una capa de roca caliente permeable, rodeado de capas de roca impermeable, que contienen el fluido geotérmico. Este último es agua en fase líquida o gaseosa, que usualmente acarrea algunos químicos y gases. El principio de funcionamiento del sistema geotérmico es la convección, ocurriendo debido al calentamiento y la consecuente expansión térmica de fluidos. El único elemento que no puede ser artificial es la

fuente de calor, no obstante, con la tecnología apropiada es posible reproducir un sistema geotérmico. (Dickson & Fanelli, 2004)

3.1.1 GEOTERMIA EN HONDURAS

Las Naciones Unidas, junto con expertos internacionales, comenzaron el desarrollo de la energía geotérmica en Honduras en 1976 con un estudio que identifica áreas de interés junto con su potencial. En 1985, el Laboratorio Nacional de Los Álamos de Estados Unidos colaboró al mejoramiento del estatus del desarrollo geotérmico del país mediante un estudio más profundo, cuyo objetivo principal fue definir un plan nacional de desarrollo de los recursos geotérmicos. Se reconocieron cinco sitios con potencial de generación eléctrica: Platanares, San Ignacio, Azacualpa, Pavana y Sambo Creek. En años posteriores, la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) colaboró para la realización de los estudios geológicos y geoquímicos para identificar tres sitios adicionales: El Olivar, Namasigüe, y La Barca. De los recursos geotérmicos de altas temperaturas sólo Platanares se ha desarrollado, con 35 MW de capacidad instalada. (Henríquez, 2020)

Aproximadamente 204 fuentes de aguas termales con temperaturas entre 30 y 101 °C se han identificado en Honduras, mostradas en la ilustración 3, de las cuales 11 se encuentran en el departamento de Atlántida, 10 en Cortés, y 15 en Francisco Morazán (Henríquez Banegas, 2011).



Ilustración 3. Mapa de Honduras que ubica las manifestaciones geotérmicas

Fuente: (Programa Fomento de la Geotermia en Centroamérica, 2019)

El desarrollo geotérmico de Honduras ha sido lento en comparación con otros países de Centroamérica, debido a que los sistemas geotérmicos son de baja y media entalpía, y el interés para inversión se enfoca en recursos de alta entalpía para la generación eléctrica (García, Flores, & Sandoval, 2017).

3.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

El valor del gradiente geotérmico puede ser varias veces superior al valor de 33 °C/km debido a anomalías de origen químico, radiométrico o mecánico; sin embargo, la presencia de calor es mayor donde existan cuerpos magmáticos a distancias relativamente cortas de la superficie terrestre, originándose las diversas formas de manifestaciones volcánicas e hidrotermales. Se reconocen dos clases de regiones para el aprovechamiento de la energía geotérmica: las regiones donde la corteza terrestre es relativamente estable, por ejemplo, las masas continentales; y las regiones activas ubicadas en los límites de las placas litosféricas. Dentro de la primera clase se encuentran las áreas semi térmicas con gradientes de 30 a 50 °C/km, siendo posible obtener fluidos con temperaturas de entre 50 y 100 °C. Por otro lado, el gradiente geotérmico en las zonas activas es mucho mayor, produciéndose temperaturas entre 150 y 300 °C. (Pesce, 1994)

Esta diferenciación de regiones conduce a la clasificación de los recursos geotérmicos según la caracterización de la entalpía del fluido. La entalpía, una propiedad de los fluidos que expresa su contenido de calor, brinda una idea general del valor de la energía térmica de los recursos geotérmicos. Estos se dividen en baja, media y alta entalpía. (Dickson & Fanelli, 2004)

En términos de temperatura, la profundidad en la que se encuentran y sus usos comunes, se establecen cuatro categorías para la energía geotérmica descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la energía geotérmica

Tipo	Temperatura	Profundidad	Usos comunes
Alta entalpía	Más de 150 °C	10 km	Generación eléctrica
Media entalpía	Entre 90 y 150 °C	1 km	Generación eléctrica
Baja entalpía	Entre 30 y 90 °C	400 m	Aplicaciones industriales, climatización
Muy baja entalpía	Menos de 30 °C	2 m	Climatización

Fuente: Elaboración propia basado en (Trillo & Angulo, 2008)

A temperaturas superiores a los 150 °C es posible transformar la energía geotérmica del vapor de agua en energía eléctrica mediante una turbina. Las plantas de generación que emplean un ciclo binario, es decir, utilizan un fluido de intercambio con un punto de ebullición menor al del agua para producir electricidad con una turbina de vapor, aprovechan los recursos geotérmicos a media entalpía. La energía geotérmica a bajas temperaturas no es suficiente para la generación eléctrica, por otro lado, existen muchas aplicaciones de uso directo. (Trillo & Angulo, 2008)

3.1.3 USOS DIRECTOS

La energía geotérmica de baja y muy baja entalpía se utiliza principalmente para su uso directo. La calefacción con geotermia es la principal forma de aprovechamiento de esta energía a nivel mundial, especialmente en países con climas fríos. El enfriamiento de espacios se vuelve factible al adaptar mecanismos de absorción para usos geotérmicos. Tras el desarrollo de las bombas de calor en la década de 1980, se volvió popular su utilización para sistemas de climatización. Las aplicaciones de la energía geotérmica para la agricultura son la irrigación o calentamiento del suelo y la calefacción de invernaderos. En la acuicultura se utiliza la climatización artificial de las piscinas para cría de especies acuáticas exóticas. Para la industria el rango de usos es más extenso, incluyendo el calentamiento de procesos, evaporación, secado, destilación, esterilización, lavado, extracción de sal y químicos, recuperación de petróleo, entre otros. (Dickson & Fanelli, 2004)

Un resumen de los usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial se realizó para el Congreso Mundial de Geotermia 2020, en el cual se describe cómo ha aumentado la utilización de diferentes tipos de tecnologías, mostrado en la ilustración 4. Desde 2015 ha aumentado la popularidad de las bombas de calor geotérmicas en el mundo, debido a que esta tecnología tiene la capacidad de utilizar el agua subterránea o el calor del suelo en cualquier parte. La mayoría de estas instalaciones se encuentran en Norte América, Europa y China. Las siguientes dos aplicaciones más utilizadas son para piscinas de agua caliente y calefacción de edificaciones. (Lund & Toth, 2021)

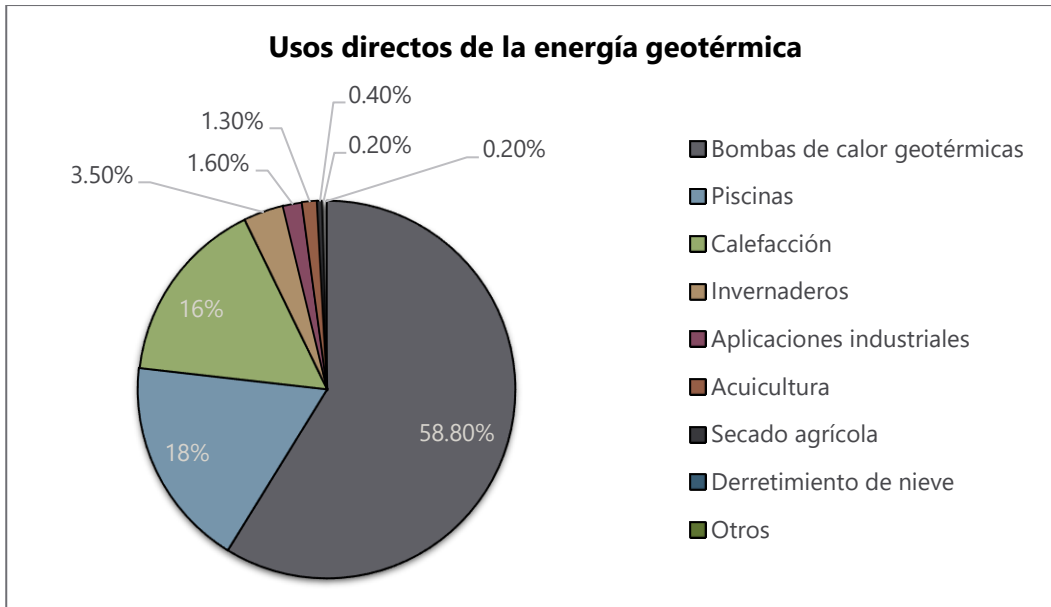


Ilustración 4. Porcentaje de usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial

Fuente: Elaboración propia basado en (Lund & Toth, 2021)

3.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y GEOLÓGICAS EN HONDURAS

Es importante conocer las condiciones climáticas de Honduras, específicamente de las ciudades de interés para el análisis, ya que son un aspecto clave para el diseño del sistema de climatización geotérmico.

3.2.1 CLIMA

El clima en Honduras se divide en tres zonas: cálida, templada y fría; delimitadas en función de la altitud (Dirección General de Biodiversidad, 2000). Se caracteriza como tropical por su ubicación geográfica, pero la orografía, corrientes de vientos y fenómenos tropicales generan microclimas que van desde tropical seco hasta tropical húmedo (Argeñal, 2010).

A nivel nacional la temporada de lluvias comienza en mayo y concluye en noviembre, con mayor volumen de agua en las zonas más elevadas sobre los 1600 msnm. Entre diciembre y febrero hay una sequía estacional casi en todo el territorio. Ocurre un veranillo o Canícula en las zonas montañosas y el litoral pacífico durante julio y agosto. (Navarro-Racines, Monserrate, Llanos-Herrera, Obando, & Córdoba, 2018)

La temperatura ambiente depende de la cantidad de irradiación solar global recibida, que es prácticamente igual durante todo el año, sin embargo, las zonas cercanas al mar y las zonas de mayor altitud presentan variaciones extremas. Durante diciembre, enero y febrero se obtienen las temperaturas más bajas. El mes más caliente es abril, pero las temperaturas más altas se han documentado durante junio. (Navarro-Racines, Monserrate, Llanos-Herrera, Obando, & Córdoba, 2018)

3.2.2 TEMPERATURAS

El Valle de Sula tiene una temperatura media anual de alrededor de 28 °C, al igual que el Valle de Lean, mientras que en el Distrito Central es de 24 °C (Navarro-Racines, Monserrate, Llanos-Herrera, Obando, & Córdoba, 2018). En las ilustraciones 5(a), 5(b) y 5(c) se presentan los mapas de las zonas de interés que muestra la temperatura media anual de la línea base del clima.

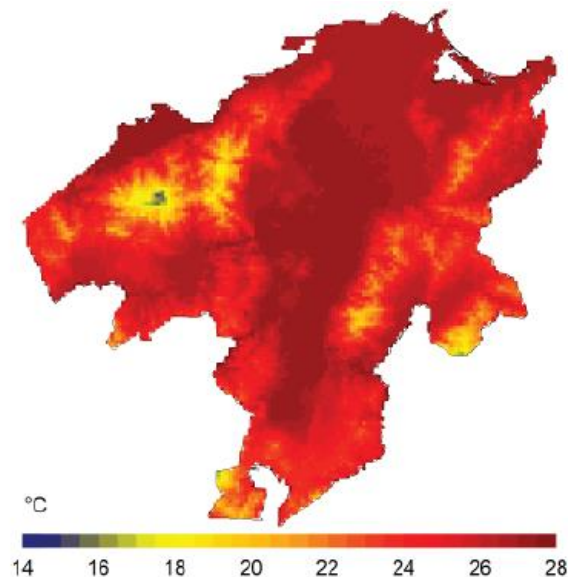


Ilustración 5(a). Mapa del Valle de Sula de temperatura media anual

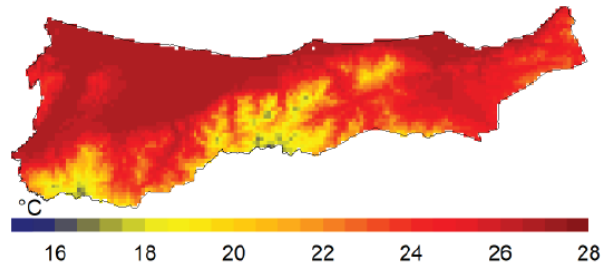


Ilustración 5(b). Mapa del Valle de Lean de temperatura media anual

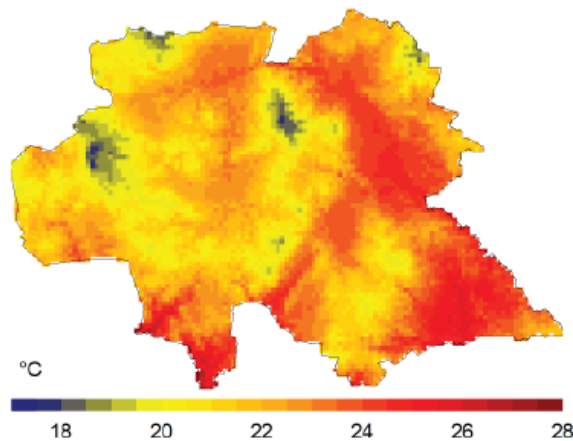


Ilustración 5(c). Mapa del Distrito Central de temperatura media anual

Fuente: (Navarro-Racines, Monserrate, Llanos-Herrera, Obando, & Córdoba, 2018)

3.2.3 SUELOS

Conocer las propiedades del suelo en un sitio de interés para el aprovechamiento geotérmico es necesario porque la conductividad térmica define la capacidad de almacenamiento de calor para un sistema geotérmico. Trillo y Angulo (2008) sostienen que: "El comportamiento de los terrenos en cuanto a la transmisión del calor a través de ellos y su capacidad de almacenarlo, coincidirán en gran medida el rendimiento" (pág. 84).

Los suelos de San Pedro Sula y La Ceiba pertenecen a la clasificación de suelos Tomalá, los cuales son bien avenados, relativamente poco profundos, formados sobre esquisto y gneis con alguna mezcla de mármol y cuarcita. El perfil de suelo contiene franco limoso, franco arcillo-limoso, arcilla y saprolito. (Simons, 1969)

En Tegucigalpa se hallan muchos tipos de suelos entremezclados, entre ellos los suelos Jacaleapa, Orica, y Guaimaca. Los suelos Jacaleapa son bien arenados, poco profundos, formados sobre esquistos no micáceos o con escaso contenido de mica, conteniendo franco limoso, franco arcillo-limoso y esquistos meteorizados; los Orica son excesivamente arenados, poco profundos, formados sobre micasquisto, cuyo perfil contiene franco-arenoso fino, franco-arenoso fino con grava y esquisto metamorfoseado; los Guaimaca son relativamente profundos, de bien a excesivamente arenados, formados sobre micasquisto, conteniendo franco limoso micáceo con grava, franco arcilloso con grava, arcilla micácea y micasquisto meteorizado. (Simons, 1969)

3.2.4 HIDROGEOLOGÍA

Los estudios hidrogeológicos locales son requeridos en caso de aprovechar acuíferos poco profundos para probar su comportamiento hidráulico y térmico, además de evaluar la calidad del agua (Trillo & Angulo, 2008).

Tres formaciones rocosas rodean Tegucigalpa: el Grupo Valle de Ángeles al este y sur, compuesta de lutitas, areniscas y conglomerados; la Formación Matagalpa al norte, compuesta de andesitas y lavas de basalto; y el Grupo Padre Miguel al sur y suroeste, compuesto de cenizas volcánicas. En algunas zonas centrales y en las riberas de los ríos Grande y Chiquito se encuentra aluvión. En los suelos compuestos de conglomerado, la transmisividad es de $5 \text{ m}^2/\text{día}$, mientras que en las lutitas fracturadas llega a ser de $500 \text{ m}^2/\text{día}$. (Ochoa Álvarez, Mejía, & Portillo, 1989)

El Valle de Sula está conformado principalmente de arena fina, limo y capas de grava discontinuas. Específicamente hacia el noreste de San Pedro Sula hay presencia de aluvión cortado por una serie de colinas compuestas por esquisto Cacaguapa y granodiorita. Hacia el sur del valle la formación es volcánica con coladas de basalto. Las transmisividades varían desde menos de 10 hasta $2000 \text{ m}^2/\text{día}$, siendo mayores al norte de la ciudad de San Pedro Sula y al sur en Chamelecón. Ídem

El valle de Lean, entre Tela y La Ceiba, contiene depósitos delgados e irregulares con exposiciones de roca en ciertos lugares. La presencia de acuíferos se limita debido a la descomposición extrema de la roca metamórfica en las capas de arcilla y limo entre la llanura y los cerros. Alrededor de los

ríos Cangrejal y Danto en La Ceiba, el acuífero principal se conforma de aluvión compuesto de depósitos de graves, arenas gruesas, arcillas y bolones de diversos tamaños. (Ochoa Álvarez, Mejía, & Portillo, 1989)

En general, las aguas subterráneas son abundantes en las tierras bajas de toda la zona norte de Honduras, ya que el nivel freático está a unos pocos metros, aún en la época seca. Por otro lado, en las zonas central y sur se encuentra a muchos metros de profundidad entre noviembre y abril, bajando a medida se avanza al sur. (Dirección General de Biodiversidad, 2000)

3.3 SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

Una gran porción del consumo energético en una vivienda está destinada a la climatización. El calentamiento global y las drásticas variaciones de temperatura durante el año conducen al aumento de la utilización de acondicionamiento de aire artificial. (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017)

3.3.1 SISTEMAS CONVENCIONALES

Los dispositivos o sistemas de acondicionamiento de aire consumen una gran cantidad de energía eléctrica, gastan una mayor cantidad de agua debido a la evaporación, emiten GEI y calor al ambiente, y utilizan químicos nocivos (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017).

Se puede clasificar los sistemas de acondicionamiento central en sistemas de trayectoria simple y sistemas con doble trayectoria. Los de trayectoria simple contienen los serpentines de calefacción y refrigeración en serie dentro de la corriente de aire, suministrándolo mediante un conducto común a la misma temperatura en todos los espacios de la edificación. Por otro lado, los de trayectoria doble utilizan corrientes de aire separados para refrigeración y calefacción, con un arreglo serie-paralelo en conductos separados que dosifica la cantidad de aire frío o caliente que entra a un espacio específico de la edificación. (Beltrán, 2020)

Los equipos de acondicionamiento de aire unitarios pueden ser simples o divididos (tipo split). Estos tienen desventajas a las unidades centrales porque la temperatura de salida permanece dentro de un rango limitado, no hay muchas variaciones de configuraciones de serpentines, y las

capacidades de refrigeración son menores. Los acondicionadores de aire para recinto son los más comunes en el sector residencial y comercial. Están los acondicionadores de ventana, que incorporan un sistema completo de refrigeración por aire y un equipo para manejo de aire en una misma unidad. Por otro lado, las unidades tipo split ubican el evaporador dentro del recinto y el condensador en el exterior, necesitando dos tuberías que transportan el refrigerante desde y hacia el condensador, y que tiene más innovación electrónica que los de ventana. (Beltrán, 2020)

3.3.2 BOMBAS DE CALOR

Existe otro tipo de sistema de climatización que funciona casi de la misma manera que un refrigerador.

Una bomba de calor es esencialmente una máquina termodinámica formada por un circuito frigorífico clásico del que se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador y no la que se absorbe en el evaporador del aire ambiente o del agua de un pozo o de un río. (Rey Martínez, 2005, pág. 13)

Las bombas de calor pueden ser reversibles, ya que poseen una válvula de cuatro vías, haciendo posible proveer tanto calor como frío a un espacio. Al ser máquinas, necesitan electricidad para su operación; sin embargo, bajo condiciones climáticas favorables y un diseño apropiado, se observa un balance energético positivo. (Dickson & Fanelli, 2004)

El compresor es el principal componente de la bomba de calor, el único elemento cuya operación consume energía eléctrica y requiere de constante mantenimiento; aumenta la presión del refrigerante que procede del evaporador. Este último y el condensador son intercambiadores de calor para el refrigerante, el primero absorbiendo calor de un medio y el segundo cediéndolo a otro medio. El cuarto componente de la bomba de calor es el dispositivo de expansión, el cual separa la diferencia de presiones bajo las cuales se somete el refrigerante, regulando el flujo y reduciendo la presión. (Rey Martínez, 2005)

El ciclo teórico de la bomba de calor procede del ciclo inverso de Carnot, representado en la ilustración 6. Son máquinas reversibles que transfieren energía al absorber calor de un espacio frío para liberarlo en un espacio caliente; de igual manera, pueden trabajar en el proceso opuesto,

absorbiendo calor de un espacio caliente para liberarlo en un espacio frío. Es necesario un fluido de trabajo para la transferencia de calor mediante la convección, denominado refrigerante, y requiere una entrada de energía adicional, que usualmente es energía eléctrica. Las bombas de calor se caracterizan por su coeficiente de rendimiento (COP), que corresponde al número de unidades de energía entregadas a la fuente de calor. (Cengel & Boles, 2012)

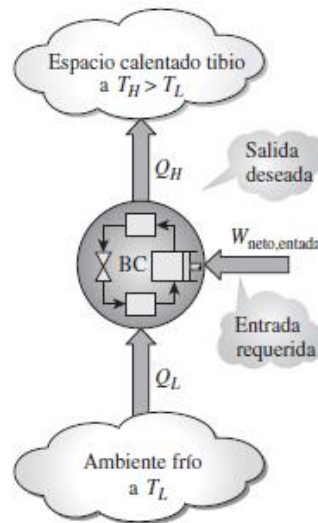


Ilustración 6. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

Los métodos más comunes de enfriamiento son por compresión o por absorción. En el enfriamiento por compresión se utiliza un sistema mecánico, la fuente de energía es eléctrica, el refrigerante suele ser halones, CHC clorado, o hidrocarburos libres de cloro, y el COP está entre 4 y 6. El sistema de enfriamiento por absorción tiene una compresión mediante un bucle de absorción térmica, utilizando una fuente de calor entre 85 y 150 °C, con un refrigerante en base a agua con bromuro de litio como el agente de absorción, ofreciendo un COP entre 0.6 y 1. (Johannesson, Gudmundsson, & Gudmundsdottir, 2016)

En el caso de un sistema de bomba de calor con cogeneración para agua caliente sanitaria (ACS), el COP se mide como la energía suministrada al sistema de ACS entre la entrada de energía por el compresor (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017). Se puede convertir a un sistema híbrido implementando módulos solares fotovoltaicos para la generación de la energía eléctrica necesaria

para la bomba de calor, así asegurando que el sistema sea completamente sostenible y no emita dióxido de carbono (CO₂). (Franke & Nakagawa, 2017)

3.3.3 POZOS PROVENZALES

El método de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía con pozos provenzales o canadienses consiste en enterrar tubos a una profundidad de entre 2 y 5 m, y hacer pasar aire que intercambian calor con el subsuelo mediante convección. Existe una diferencia de temperatura entre el subsuelo, la cual permanece relativamente constante en todo el año, y la temperatura ambiente, que puede ser menor o mayor; el aire se calienta o enfría y se hace circular hacia el interior de la edificación. Cabe mencionar que el rendimiento del pozo provenzal es mayor durante el verano, ya que en invierno no se logra una diferencia de temperatura significativa para aportar el calor necesario para el confort. Este sistema de intercambiador de calor aire-suelo, del cual se presenta una simplificación en la ilustración 7, se puede configurar de las siguientes maneras: anillo, que consiste en rodear la edificación con la tubería enterrada, rejilla, que consiste en una red de tuberías enterradas, o vertical, que consiste en una tubería enterrada verticalmente. (Pérez, Perietti, & Francisca, 2018)



Ilustración 7. Pozo provenzal

Fuente: (EN ESTADO CRUDO, 2019)

Se necesita un punto de captación de aire donde ingresa el fluido al sistema, posicionado a una altura donde no se contamine, que tenga un filtro para garantizar la entrada de aire puro. Está la opción de incluir un elemento de circulación de aire, que puede ser mecánico o pasivo. Ocurre una condensación de agua dentro de las tuberías debido a las variaciones de humedad del suelo, que debe ser drenada en un punto al final del tubo, ya sea mediante un recinto con un lecho de grava donde se filtre el agua al suelo o un mecanismo de acumulación y extracción con bombeo. Este aspecto requiere que la tubería tenga una pendiente mínima entre 2 y 5%. (Pérez, Perietti, & Francisca, 2018)

3.4 BOMBAS GEOTÉRMICAS

Un sistema de bomba de calor geotérmica se puede utilizar directamente con el suelo o con recursos geotermales. La bomba de calor geotérmica tiene la posibilidad de trabajar con temperaturas de producción bajas y aumentar la temperatura de entrada (Pesce, 1994). Esta tecnología es la más utilizada a nivel mundial en los sectores residencial, comercial e industrial, para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja y muy baja entalpía, una alternativa eficiente para tanto calefacción como para refrigeración (Yousefi, y otros, 2015). Una diferencia entre un sistema de climatización geotérmico y un sistema convencional es el sumidero de calor; cuando el sistema geotérmico refrigera, disipa el calor directamente en la tierra, mientras que un sistema convencional disipa el calor en el aire (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017).

La bomba geotérmica funciona con dos bucles simultáneos para proveer refrigeración y calefacción paralelamente de manera energéticamente eficiente, moviendo la energía térmica en la dirección opuesta al flujo espontáneo de calor absorbiéndolo de un espacio frío y liberándolo en un espacio más cálido. Utiliza una cantidad de energía eléctrica para realizar el trabajo de transferencia de energía desde la fuente de calor hacia el sumidero. Una bomba geotérmica basada en el ciclo de compresión de vapor consiste en cuatro componentes: evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión. En la ilustración 8 se muestran los dos modos de funcionamiento de las bombas geotérmicas. El evaporador absorbe calor del medio frío, el compresor presuriza el refrigerante, el calor se rechaza al medio caliente en el condensador, y la válvula de expansión ecualiza la presión del sistema. (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017)

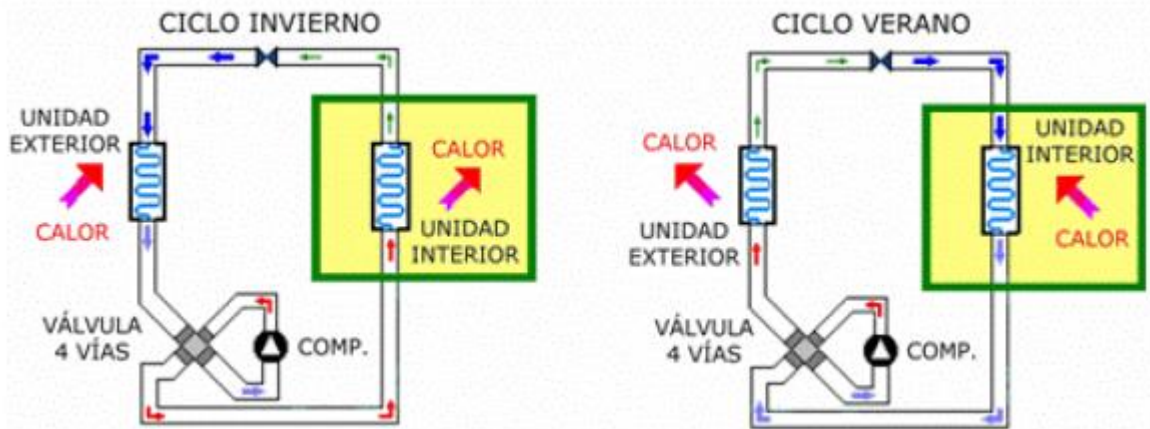


Ilustración 8. Modos de funcionamiento de una bomba de calor

Fuente: (Trillo & Angulo, 2008)

La característica más llamativa de las bombas geotérmicas es su reversibilidad, la capacidad de funcionar tanto en modo de calefacción como en modo de enfriamiento, y esto es posible utilizando una válvula reversible de cuatro vías que conecta el compresor, el evaporador y el condensador, y una válvula de expansión de doble sentido. Es por esta razón que los últimos dos componentes cambian su función en el sistema. Durante el ciclo inverso de Carnot para calefacción, la válvula reversible une el evaporador al compresor y la válvula de expansión va del condensador al evaporador. En el ciclo inverso, la válvula reversible permite que el fluido pase del evaporador, que antes funcionaba de condensador, hacia el compresor, y la válvula de expansión invierte su sentido. (Gutiérrez & Estrella, 2012)

3.4.1 CONDICIONES EXTERIORES

Las condiciones meteorológicas del sitio donde se implementa un sistema de climatización deben conocerse, específicamente la temperatura y la humedad relativa; de igual manera, la composición geológica del suelo tiene un gran impacto en el rendimiento de los sistemas con bombas de calor geotérmicas (Yousefi, y otros, 2015). En la tabla 2 se presentan los valores de permeabilidad, conductividad y capacidad térmica volumétrica para los tipos de suelos más comunes.

Tabla 2. Principales características de tipos de suelos comunes

Tipo de suelo	Permeabilidad	Conductividad térmica		Capacidad térmica volumétrica	
		Seco	Saturado	Seco	Saturado
Arcilla	10^{-8} a 10^{-10} m/s	0.2 a 0.3 W/mK	1.1 a 1.6 W/mK	0.3 a 0.6 MJ/m ³ K	2.1 a 3.2 MJ/m ³ K
Limo	10^{-5} a 10^{-8} m/s	0.2 a 0.3 W/mK	1.2 a 2.5 W/mK	0.6 a 1.0 MJ/m ³ K	2.1 a 2.4 MJ/m ³ K
Arena	10^{-3} a 10^{-4} m/s	0.3 a 0.4 W/mK	1.7 a 3.2 W/mK	1.0 a 1.3 MJ/m ³ K	2.2 a 2.4 MJ/m ³ K
Grava	10^{-1} a 10^{-3} m/s	0.3 a 0.4 W/mK	1.8 a 3.3 W/mK	1.2 a 1.6 MJ/m ³ K	2.2 a 2.4 MJ/m ³ K

Fuente: (Pahud, 2002)

La zona subsuperficial que oscila entre 10 y 100 m de profundidad tiene una temperatura promedio que permanece constante todo el año, pero varía según la ubicación. De 0 a 10 m de profundidad, la temperatura del suelo depende directamente del clima; sin embargo, después de los 10 m es afectada tanto por el gradiente térmico como de la temperatura del aire. La ilustración 9 muestra el comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad. Se considera que en promedio la temperatura del suelo es igual al valor medio anual de la temperatura ambiente. (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017)

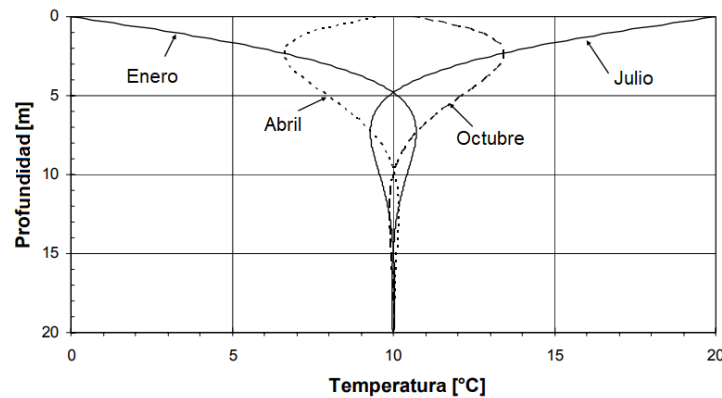


Ilustración 9. Perfil de temperatura vertical del suelo a lo largo de un año

Fuente: (Pahud, 2002)

3.4.2 CONDICIONES INTERIORES

La base del diseño de un sistema de climatización es la carga térmica del espacio específico, la cual puede variar durante las diferentes estaciones del año. El cálculo de este valor depende de los materiales que componen el espacio, el área por climatizar y la temperatura seleccionada para el diseño que cumple con el confort humano. Yousefi et al. (2015) utilizan la ecuación para calcular la carga térmica en un invernadero mensual, tomando en cuenta el coeficiente de transferencia de calor U en W/m^2 , el área total del espacio A en m^2 , y la diferencia de la temperatura ambiente exterior y la interior deseada ΔT en $^{\circ}C$. Ambas temperaturas deben ser el valor mínimo correspondiente.

$$Q = \frac{U \cdot A \cdot \Delta T}{1000}$$

Ecuación 1. Carga térmica de un espacio

Fuente: (Yousefi, y otros, 2015)

Una vivienda experimenta ganancias de calor debido a la radiación solar, el consumo de aparatos eléctricos, y la ocupación de personas y animales. También ocurren pérdidas de calor producidas por las paredes, techos, aberturas, piso, etc., y las renovaciones de aire que son necesarias para la calidad del aire. Para mantener la vivienda a una determinada temperatura de confort, se debe generar calor o frío para compensar las pérdidas o ganancias, respectivamente. La transferencia de calor que ocurre por la envolvente de la vivienda depende en gran medida de la calidad de los materiales y tipo de aberturas, pues un buen aislamiento térmico puede significar un importante ahorro de energía. (Iannelli, Fiora, & Gil, 2013)

3.4.3 TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS

Se pueden agrupar dos tipos principales de sistemas con bombas geotérmicas: circuito abierto y circuito cerrado. Un sistema a circuito abierto bombea agua subterránea o de un acuífero de poca profundidad mediante un pozo, atravesando los procesos de transferencia de calor, y termina depositándose en otro pozo hacia la misma fuente. Por otro lado, un circuito cerrado utiliza un sistema de tuberías enterradas bajo tierra o en un pozo, por el cual circula un fluido de trabajo

anticongelante que en ningún momento está en contacto directo con la tierra, atraviesa los procesos de transferencia de calor y permanece en un ciclo. En la ilustración 10 se esquematizan algunas configuraciones de los sistemas con bombas geotérmicas, las cuales según el tipo de intercambiadores de calor puede ser un sistema horizontal o un sistema vertical. (Yousefi, y otros, 2015)

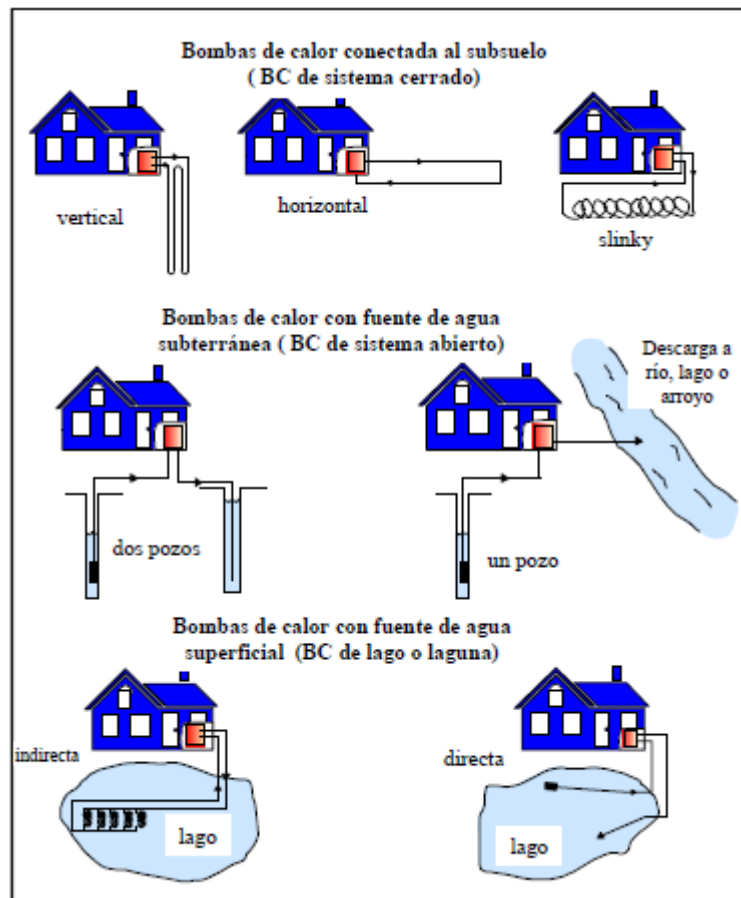


Ilustración 10. Tipos de sistemas con bombas de calor geotérmicas

Fuente: (Gutiérrez & Estrella, 2012)

La bomba de calor en un circuito cerrado trabaja con un bucle doble: uno funciona como condensador, denominándose el bucle de fuente de calor, mientras que el otro funciona como evaporador, el bucle de sumidero de calor. Cada uno de los bucles son sistemas cerrados, es decir, el fluido de trabajo circula en el bucle sin pérdidas de masa durante el proceso. En la práctica se requiere de un suministro de agua de compensación para asegurar que el sistema funcione

correctamente. El subsuelo actúa tanto de fuente como de sumidero, dependiendo del modo de utilización de la bomba geotérmica según la estación del año, y la edificación hace la función opuesta. (Vaidya, Shah, Sircar, & Sahajpal, 2017)

Las instalaciones de aprovechamiento geotérmico se agrupan en: colectores horizontales enterrados, sondas geotérmicas, sondeos de captación de agua someros, cimientos geotérmicos. A una escasa profundidad se puede enterrar una configuración cerrada de tubos de polietileno en un área que sea 1.5 veces la del espacio a acondicionar en caso de viviendas nuevas, y 3 veces para casas antiguas, dependiendo del aislamiento térmico utilizado. Los colectores de calor en posición vertical a profundidades desde 20 m hasta más de 100 m, con diámetros de perforación de 10 a 15 cm, son ideales bajo limitaciones de superficie, canalizaciones o mayor demanda energética. En zonas donde la capa freática puede ser aprovechada, el uso de dos sondeos, uno que bombee el agua subterránea hacia la bomba de calor y otro aguas abajo que reinyecte el agua utilizada, emplea un sistema abierto. En una nueva edificación donde se debe emplear una cimentación profunda con pilotes de concreto a nivel de la capa freática entre 10 y 40 m, se pueden introducir tubos de polietileno en circuito cerrado que intercambien calor con la tierra y una bomba de calor. (Trillo & Angulo, 2008)

3.4.4 FLUIDOS DE TRABAJO

Los sistemas de geotermia de muy baja entalpía requieren un fluido de alta compresibilidad y bajo punto de vaporización que absorba calor del subsuelo o de una instalación, para transmitirlo a la instalación o el subsuelo, respectivamente. Este fluido con baja inercia térmica suele ser agua con un aditivo anticongelante, como glicol. (Trillo & Angulo, 2008)

A pesar de ser los más utilizados por mucho tiempo, debido a su alto grado de peligrosidad a la capa de ozono, los clorofluorocarbonos (CFC) se han prohibido en muchos países. Una opción menos contaminante son los hidroc fluorocarbonos (HCFC), cuyo potencial de agotamiento del ozono (ODP) es de 2 a 5% de CFC-12, con un potencial global de calentamiento (GWP) de 20% del valor de CFC-12. Están otros fluidos alternativos, los hidrofluorocarbonos (HFC), que tienen un ODP neutral. En muchos países, como Estados Unidos y Japón, utilizan mezclas que

pueden reemplazar los CFC y algunos HCFC, por ejemplo, el R-407C y el R-410A. (Gutiérrez & Estrella, 2012)

3.4.5 RENDIMIENTO

El rendimiento de las bombas de calor por compresión mecánica operando a determinadas condiciones de la fuente y el sumidero de calor está dado por el COP, y se calcula realizando el cociente entre la energía cedida por la bomba de calor y el trabajo realizado por el compresor. Para ambos modos de funcionamiento es posible calcular este indicador, siendo que para refrigeración la bomba de calor cede energía hacia la tierra y para calefacción cede energía hacia el espacio acondicionado. (Gutiérrez & Estrella, 2012)

$$COP = \frac{Q_{CO}}{W} = \frac{Q_{CO}}{Q_{CO} - Q_{EV}}$$

Ecuación 2. COP en modo calefacción

$$COP = \frac{Q_{EV}}{W} = \frac{Q_{EV} + W}{W}$$

Ecuación 3. COP en modo refrigeración

Fuente: (Gutiérrez & Estrella, 2012)

Lund y Toth (2021) determinaron que el COP promedio para las unidades de bombas geotérmicas instaladas a nivel mundial es de 3.5, permitiendo que por cada unidad de energía, usualmente electricidad, introducida se obtienen 2.5 unidades de energía de salida para un componente geotérmico de 71% de la capacidad nominal. Gutiérrez y Estrella (2012) encuentran que el COP puede llegar hasta 10 en el régimen de calefacción, mientras que en el régimen de refrigeración se mantiene alrededor de 3.5.

3.4.6 COSTOS DE INVERSIÓN

El principal reto de desarrollo de la tecnología de las bombas de calor geotérmicas es su alto costo inicial, casi el doble de un sistema central convencional en una vivienda; sin embargo, los costos de operación son mucho menores a los sistemas convencionales por la alta eficiencia y menor costo de mantenimiento. Se estima que el precio de un sistema de climatización con

bomba de calor geotérmica está dentro del rango de \$500/kW a \$850/kW para tamaños entre 2 y 19 kW con eficiencias de 280 a 500% y una vida útil de 15 a 20 años. Este costo puede aumentar hasta \$1700/kW para un sistema de circuito cerrado horizontal, pero depende de las condiciones climáticas y geológicas. (Gutiérrez & Estrella, 2012)

Aproximadamente un 30% del costo total de instalación de un sistema de bomba geotérmica está destinado a la instalación de los intercambiadores de calor, es decir, los sistemas de tuberías en ciclo cerrado, y es un aspecto significativamente costoso comparado con los sistemas convencionales. Los sistemas verticales requieren de una mayor inversión que los sistemas horizontales, debido al costo de perforación de los pozos; sin embargo, los sistemas verticales no necesitan disponer de una gran cantidad de superficie de suelo, a diferencia de los horizontales. El costo de perforación de pozos verticales varía entre \$16.4/m a \$50.9/m, dependiendo de las características geológicas del sitio. El costo de excavación de zanjas horizontales está en un rango de \$9.8/m a \$29.5/m. (Liu, Polsky, Qian, & McDonald, 2019)

El periodo de retorno del capital para un sistema con bomba de calor geotérmica se encuentra dentro de los 10 años, ya que es posible tener desde un 30 hasta un 75% de ahorro en el consumo de energía. Para el sector residencial se estima un periodo de retorno de capital de 6.8 años, 2.8 años para el sector comercial y 7 para proyectos en instituciones educativas. Cuando el sistema geotérmico se implementa en nuevas edificaciones, los costos forman parte de la inversión inicial, y si se integra el abastecimiento de ACS, el monto total se vuelve más aceptable. (Gutiérrez & Estrella, 2012)

3.5 EMPRESAS DE SERVICIOS ENERGÉTICOS

Las ESE se pueden definir de la siguiente manera:

Son organizaciones que proporcionan servicios energéticos en las instalaciones de un usuario determinado, estando el pago de los servicios basado en la obtención de ahorros de energía. Estos ahorros se conseguirán a través del desarrollo de mejoras de la eficiencia energética de las instalaciones o mediante la utilización de fuentes de energía renovable. (Garrigues Medio Ambiente, 2010, pág. 7)

Las ESE están orientadas a mejorar la forma en que se utiliza la energía, ofreciendo implementar soluciones de eficiencia energética en todo el espectro de proyectos de manera integral, compartiendo el riesgo técnico y proporcionando apoyo en los acuerdos de financiamiento. Un proyecto de una ESE comienza con una auditoría energética, un análisis sistemático del uso y consumo de la energía para identificar, cuantificar y reportar las oportunidades para mejorar el desempeño energético. (Bonilla, 2020)

La segunda etapa es el diseño del proyecto, demostrando que existe la oportunidad de ahorro y la reducción de costos, entre otros beneficios. La siguiente fase es la implementación del proyecto, cuyo propósito puede ser la disminución del consumo energético, mayor eficiencia de equipos, sustitución de fuentes de energía convencionales por renovables, reducción de emisiones de GEI, entre otros. Como tercera etapa está la operación y el mantenimiento del proyecto, durante la cual se da un monitoreo y control a las medidas implementadas, para garantizar el cumplimiento de los objetivos. Por último, se debe medir y verificar los ahorros conseguidos por el proyecto, para determinar si el proyecto logró sus objetivos o si se debe rediseñar, mediante una metodología como el Protocolo Internacional de Medición y Verificación. (Garrigues Medio Ambiente, 2010)

El alcance de las ESE en proyectos de energía es amplio y se adapta a las necesidades del cliente, y las posibles oportunidades de desarrollo sólo se limitan a la actual innovación y disponibilidad de tecnología de eficiencia energética y de aprovechamiento de las energías renovables. Por esta razón, la energía geotérmica se encuentra dentro de los posibles rubros de desarrollo para una ESE. El modelo de negocio tiene un amplio desarrollo en todo el mundo, especialmente en Estados Unidos, Alemania, Canadá y España. Ídem

3.5.1 ESTADO DEL MERCADO EN HONDURAS

Actualmente la electricidad es la fuente de energía más comúnmente usada para los sistemas de climatización convencionales. En Estados Unidos se proyecta que al 2040 el consumo de energía para la refrigeración de espacios en el sector residencial tenga un crecimiento constante, y debido al incremento de los precios de la energía eléctrica y el esfuerzo por utilizar energías con bajas

emisiones de CO₂, la opción de un sistema de climatización geotérmico se vuelva más interesante en el mercado. (Johannesson, Gudmundsson, & Gudmundsdottir, 2016)

Existe un mercado virgen que no se ha considerado para su desarrollo en Honduras, y es el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja y media entalpía, especialmente alrededor de las zonas de potencial geotermal, ya que no requieren de una alta inversión. Para esto se necesita un fortalecimiento de la infraestructura, capacitación del recurso humano en las tecnologías de uso directo de la geotermia, y un ordenamiento jurídico que promueva la inversión privada. (Programa Fomento de la Geotermia en Centroamérica, 2019)

3.5.2 LEGISLACIÓN

El marco legal actual para ciertos proyectos de energías renovables en Honduras es favorable, ya que se desea promover la inversión que impulse el desarrollo sostenible del país y contribuya a la mitigación del cambio climático. Las oportunidades de desarrollo de la energía geotérmica en Honduras implica un proceso multidisciplinario para afrontar las barreras existentes. La política energética integral de largo plazo que la Secretaría de Energía comenzó en 2018 debe contener una política específica para el desarrollo geotérmico. La creación del marco legal y técnico para asuntos ambientales y sociales presenta deficiencias para cualquier proyecto con energías renovables, el cual debe garantizar la seguridad de los desarrolladores e inversionistas, reduciendo todo tipo de riesgos. Son necesarios programas de financiamiento flexibles y esquemas de incentivos o subsidios para la inversión en proyectos con energía geotérmica. Además, el recurso humano capacitado y especializado en las diversas tecnologías de aprovechamiento geotérmico debe ser impulsado. (Henríquez, 2020)

El marco regulatorio presentado no menciona específicamente la exploración y explotación del recurso geotérmico en Honduras. De hecho, las leyes vigentes que involucran las energías renovables sólo regulan el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica. Más aún, como bien plantea el Programa de Fomento de la Geotermia en Centroamérica (2019): “En lo que respecta al uso directo de la geotermia (...) ésta no se encuentra cubierta por el marco regulatorio, por lo que se carece de cualquier tipo de regulación” (pág. 3).

IV. METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

Se analizará la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de climatización con geotermia de muy baja entalpía en una vivienda ubicada en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba, de manera tanto cualitativa como cuantitativa, por lo que el enfoque es mixto. El proyecto de investigación es descriptivo, no experimental y transversal, porque sigue un orden correlativo y empírico, las variables no se manipulan y se toman de un tiempo preciso.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

1. Temperatura anual media
2. Conductividad térmica del suelo
3. Capacidad térmica volumétrica
4. Permeabilidad del suelo
5. COP
6. Costo de inversión inicial
7. Periodo de retorno de capital

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Se determinará la aceptación de un proyecto de uso directo de la energía geotérmica en el sector residencial de Honduras mediante un estudio técnico, que según Rosales (2005) "identifica los equipos, la maquinaria, las materias primas, y las instalaciones necesarias para el proyecto y, por lo tanto, costos de inversión y de operación así como el capital de trabajo que se necesita" (pág. 115); y un estudio financiero, el cual "determina el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto, cuáles serán los costos de operación, así como otra serie de indicadores" (Sarmiento R., Garzón A., & Gutiérrez-Junco, 2019, pág. 75), basados en datos históricos.

Para el estudio técnico se empleará el método de los factores ponderados para una evaluación de la localización, el cual identifica los factores más relevantes, establece una ponderación en

función de su importancia relativa, puntuando cada criterio y obteniendo una calificación global (Córdoba Padilla, 2011).

4.4 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Se definirá el tipo de proceso empleado para la implementación de un sistema de climatización geotérmico, que incluye la materia prima, la mano de obra, el consumo de energía, la tecnología, los permisos, entre otros. Se evaluarán los factores de temperatura media anual, propiedades del suelo y disponibilidad de espacio para la ubicación de posibles proyectos en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba. La ingeniería del proyecto se describirá al seleccionar el proceso de producción, determinar la tecnología y la instalación de los componentes del sistema de climatización geotérmico, y elaborar un diagrama del proceso.

Se elaborará un presupuesto de inversión para la implementación de un sistema de climatización geotérmico según el proceso de producción seleccionado, un análisis de precios unitarios de los componentes del sistema, una descripción detallada de los costos indirectos del proyecto, y un cronograma de ejecución correspondiente como parte del estudio financiero.

4.5 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 3. Cronograma de actividades

Actividades										
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inducción a Proyecto Fase I	■									
Primera Reunión Asesor Temático		■								
Primer Avance (29 de enero)		■								
Segunda Reunión Asesor Temático				■						
Segundo Avance (15 de febrero)					■					
Tercera Reunión Asesor Temático						■				
Tercer Avance (5 de marzo)						■				
Cuarta Reunión Asesor Temático								■		
Cuarto Avance (17 de marzo)								■		
Entrega Final (26 de marzo)										■

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICO

El sistema de climatización geotérmico es un conjunto de mecanismos destinados al acondicionamiento del aire de una edificación, que utiliza el subsuelo como fuente de calor durante el modo de funcionamiento de calefacción y como sumidero durante el modo de refrigeración, y requiere de una cantidad mínima de electricidad.

5.1.1 FUNCIONAMIENTO

Compuesto de una bomba de calor reversible, un bucle de sumidero y un bucle de fuente de calor, el sistema de climatización geotérmica funciona con el ciclo inverso de Carnot, más específicamente, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor. La termodinámica se representa mediante un esquema y un diagrama T-s en la ilustración 11. Ver Anexo 1 para conocer el procedimiento para calcular el COP a partir del ciclo termodinámico.

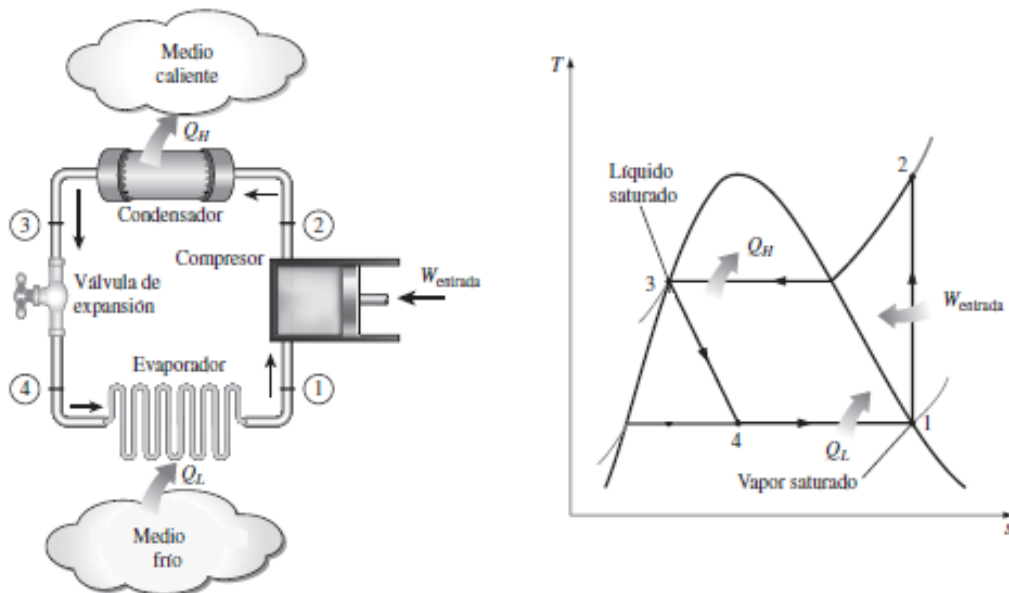


Ilustración 11. Ciclo de funcionamiento de sistema de climatización geotérmico

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

El ciclo comienza cuando el compresor, energizado por una corriente eléctrica, aumenta la presión del refrigerante de manera isentrópica, es decir, que la entropía del fluido permanece constante (del punto 1 al 2 en la ilustración 11). Justo antes de la compresión también ocurre un ligero sobrecalentamiento para asegurar la completa evaporación del refrigerante. El fluido presurizado pasa por el bucle de sumidero, o condensador, para liberar calor a más o menos la misma presión (del punto 2 al 3). Luego el refrigerante atraviesa la válvula de expansión, cediendo presión y temperatura (del 3 al 4). La última etapa del ciclo es la ganancia de calor al refrigerante cuando pasa por el bucle de fuente de calor, o el evaporador, a una presión relativamente constante (del punto 4 a 1). Cuando el fluido de trabajo absorbe calor, se vuelve a evaporar y entra al compresor, para continuar con el ciclo.

5.1.2 COMPONENTES

A continuación se describen los componentes del sistema de climatización geotérmica. En el Anexo 2 se enumeran algunos de los fabricantes más conocidos en el mercado internacional.

5.1.2.1 Bomba de calor geotérmica

El compresor se integra dentro de la bomba de calor, es hermético y puede emplear la tecnología inverter. Entra el refrigerante desde el evaporador para presurizarlo, lo cual aumenta la temperatura del fluido, para luego ir al condensador. Requiere una válvula de expansión bidireccional y una válvula de cuatro vías. Un ejemplo se presenta en la ilustración 12.

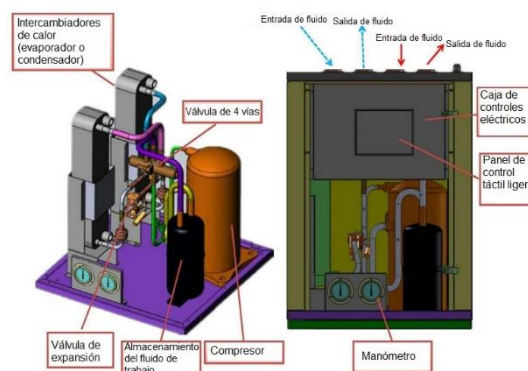


Ilustración 12. Bomba de calor geotérmica

Fuente: (Coowor, s.f.)

5.1.2.2 Bucle exterior

Tanto el bucle exterior como el interior pueden funcionar como fuente de calor y sumidero, por tanto, se describe la configuración que está enterrada en el subsuelo como el bucle exterior. Se ha descrito en la ilustración 10 las configuraciones para el sistema de captación subterránea. El material de las tuberías es polietileno de alta densidad, como se muestra en la ilustración 13.



Ilustración 13. Tubería de polietileno

Fuente: (Departamento Técnico de Saleplas, 2018)

5.1.2.3 Bucle interior

El bucle interior utiliza el método de suelo radiante al ser el más eficiente con sistemas de bombas de calor. La ilustración 14 muestra los componentes del suelo radiante. Además de las tuberías, que también son de polietileno, necesita un panel aislante debajo de la configuración, colectores que unen el arreglo con la bomba de calor, y una banda perimetral que delimitan los espacios.



Ilustración 14. Suelo radiante

Fuente: (TERRAPILAR, s.f.)

Otros métodos para el sistema de emisión son el radiador de baja temperatura, como el de la ilustración 15, y los serpentines (fan coils, ver ilustración 16), ya que estos trabajan directamente con el aire. Algunos tipos de fan coils requiere de sistemas de ductos de aire instalados sobre el cielo falso.



Ilustración 15. Radiador de baja temperatura

Fuente: (ECODIST, 2021)

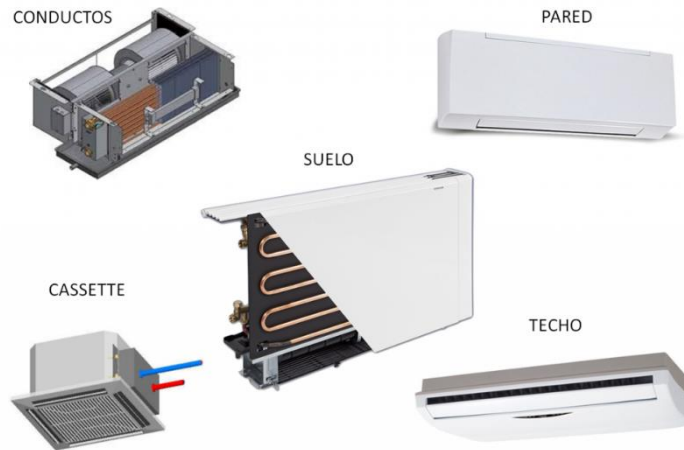


Ilustración 16. Fan coils

Fuente: (AIRZONE, 2016)

La bomba de calor geotérmica puede utilizar uno o una combinación de los métodos descritos anteriormente.

5.1.2.4 Refrigerante

El fluido de trabajo para el sistema de climatización geotérmico puede ser R-407C, R-410A, o R134A, ya que estos poseen un ODP bajo y tienen el mejor rendimiento. La ilustración 17 muestra el refrigerante más utilizado para bombas de calor geotérmicas.



Ilustración 17. Refrigerante R410A

Fuente: (Friolandia Service, 2019)

5.2 CONDICIONES DE DISEÑO

El estudio de factibilidad técnica comprende el análisis de las condiciones exteriores en Tegucigalpa, San Pedro Sula y La Ceiba. En la tabla 4 se presentan los datos recopilados para las tres posibles ubicaciones para sistemas de climatización geotérmicos.

Tabla 4. Condiciones de diseño según la ubicación

Característica	Tegucigalpa			San Pedro Sula		La Ceiba	
Temperatura media anual [°C]	24			28		28	
Tipo de suelo	Limo	Arena	Grava	Limo	Arcilla	Limo	Arcilla
Conductividad térmica [W/mK]	1.85	2.45	2.55	1.85	1.35	1.85	1.35
Capacidad térmica [MJ/m ³ K]	2.25	2.3	2.3	2.25	2.65	2.25	2.65
Permeabilidad [m/s]	5.01 ⁻⁶	5.5 ⁻⁶	5.05 ⁻²	5.01 ⁻⁶	5.05 ⁻⁹	5.01 ⁻⁶	5.05 ⁻⁹
Transmisividad [m ² /día]	252.5			1005		1005	

Fuente: Elaboración propia

La temperatura media anual de San Pedro Sula y La Ceiba es mayor que la de Tegucigalpa, debido a su ubicación geográfica. Una mayor diferencia de temperatura entre el valor exterior y el interior (el confort térmico la define en 24 °C) significa un mayor COP.

Los tipos de suelo en Tegucigalpa tienen en general mayor conductividad térmica, menor capacidad térmica volumétrica y mayor permeabilidad, que en San Pedro Sula y La Ceiba. Por otro lado, la transmisividad en Tegucigalpa es en promedio menor que en las otras dos ciudades.

5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICO

En esta sección se analizan tres aspectos a considerar para implementar un sistema de climatización geotérmico. La ubicación de un proyecto potencial influye en gran medida en su factibilidad. Para conocer el procedimiento completo de cómo diseñar un sistema de climatización geotérmico en una vivienda específica, refiérase al Anexo 3.

5.3.1 TAMAÑO DEL PROYECTO

El tipo de proceso de este estudio es por proyecto implementado. El tamaño de un proyecto de sistema de climatización geotérmico se mide con la capacidad instalada en kW necesaria para satisfacer la carga térmica de la vivienda.

5.3.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Mediante el método de factores ponderados se evalúa la factibilidad de la ubicación para posibles proyectos de implementación de sistemas de climatización geotérmicos. El factor con más peso es la temperatura. La conductividad y la capacidad térmica volumétrica son propiedades con igual importancia. Se le asigna la menor importancia a la permeabilidad, ya que esta propiedad sólo aplica cuando se emplea un sistema de captación vertical. El puntaje mayor es 10, indicando que el valor del factor es favorable, y el menor puntaje es 2, indicando valores no favorables. Ver el Anexo 4 para la escala utilizada en la tabla 5.

Tabla 5. Ubicación óptima de proyecto

Factores	Importancia	Tegucigalpa	San Pedro Sula	La Ceiba
Temperatura media anual [°C]	40%	2	10	10
Conductividad térmica [W/mK]	25%	8	4	4
Capacidad térmica [MJ/m ³ K]	25%	8	6	6
Permeabilidad [m/día]	10%	8	6	6
Puntuación total		5.6	7.1	7.1

Fuente: Elaboración propia

Tegucigalpa obtuvo la menor puntuación total, sin embargo, obtuvo mayor puntuación en los criterios de conductividad y capacidad térmica. San Pedro Sula y La Ceiba obtuvieron la misma calificación, ya que en todos los factores muestran el mismo valor.

Otro aspecto por considerar es la disponibilidad de espacio de las viviendas en cada una de las ciudades. En general se dispone de mayor superficie exterior en las viviendas de La Ceiba al ser una ciudad más pequeña y tener una orografía plana. Entre San Pedro Sula y Tegucigalpa, el Distrito Central tiene menor disponibilidad de espacio exterior, mientras que San Pedro Sula se beneficia por su orografía plana.

5.3.3 INGENIERÍA DEL PROYECTO

En la ilustración 18 se presenta el proceso de implementación de un sistema de climatización geotérmico, el cual se basa en el modelo de negocios de las ESE.

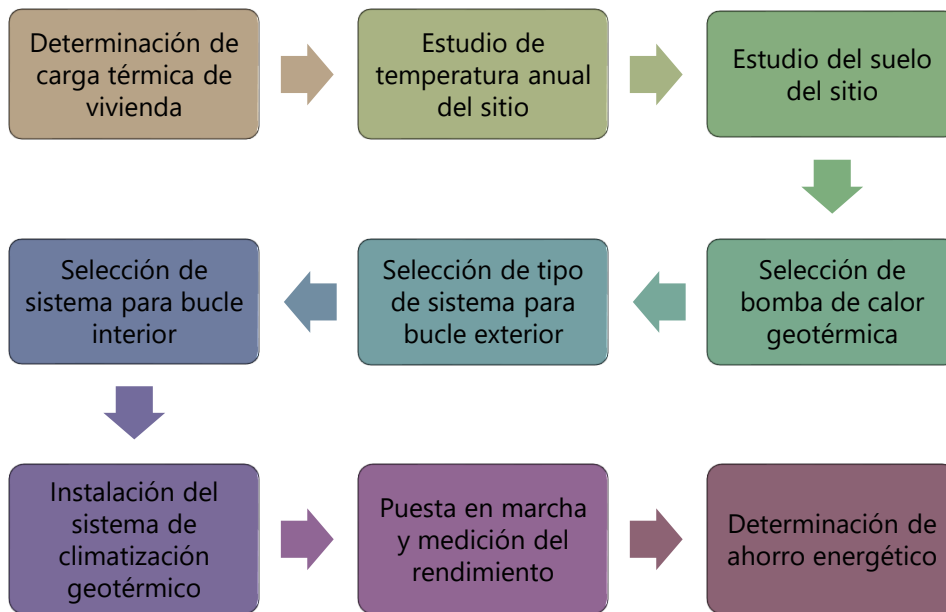


Ilustración 18. Diagrama del proceso de implementación

Fuente: Elaboración propia

La selección del modelo de la bomba de calor geotérmica dependerá del requerimiento en kW de la carga térmica de la vivienda particular, sin embargo, se analiza la selección del bucle interior y el bucle exterior con el método de factores ponderados en las tablas 6 y 7. El mayor puntaje es

10 y el menor es 2, para calificar la factibilidad de utilización en el proyecto. Las escalas utilizadas se presentan en el Anexo 4.

Tabla 6. Selección de bucle exterior

Factores	Importancia	Sistema cerrado horizontal	Sistema cerrado vertical	Sistema abierto vertical
Costo de instalación	50%	8	6	6
Utilización de espacio	35%	2	10	8
Necesidad de agua	15%	10	8	2
Puntuación total		6.2	7.7	6.1

Fuente: Elaboración propia

El sistema cerrado vertical, a pesar de tener un mayor costo de instalación, tiene la mayor calificación en comparación con las otras opciones. Un sistema abierto vertical, en cambio, requiere utilizar agua, ya sea subterránea o de algún acuífero cercano. Por esta razón obtiene la menor puntuación. El sistema cerrado horizontal tiene la desventaja de necesitar disponibilidad de espacio para lograr cubrir la demanda energética de la vivienda, y la mayoría de los hogares en el país no poseen patios grandes.

Tabla 7. Selección de bucle interior

Factores	Importancia	Suelo radiante	Radiadores	Fan coils
Costo de instalación	50%	2	6	8
Eficiencia	30%	8	2	6
Costo de mantenimiento	20%	10	6	6
Puntuación total		5.4	4.8	7

Fuente: Elaboración propia

El mecanismo de bucle interior más conveniente es fan coils, al tener un relativamente bajo costo de instalación, una eficiencia buena y un costo de mantenimiento regular. El siguiente contendiente es el suelo radiante, que a pesar de tener la mayor eficiencia y menor costo de mantenimiento, tiene un alto costo de instalación. Por otro lado, los radiadores tienen la menor puntuación, debido a que no son los dispositivos más eficientes.

5.4 GEOTERMIA VS. CONVENCIONAL

Se compara el costo de implementación, el costo de operación y mantenimiento (O&M) anual, la vida útil y el ranking de eficiencia energética, de diferentes sistemas de climatización convencional (sistema mini split, sistema con bomba de calor de aire y sistema central) con el sistema con bomba de calor geotérmica.

5.4.1 COSTO DE INVERSIÓN INICIAL

Se compara el costo de inversión inicial requerido para instalar los diferentes tipos de sistemas de climatización convencional con el valor supuesto de un sistema de climatización geotérmico. La estimación del costo del sistema se realiza en base a una vivienda de 185.6 m². La ilustración 19 muestra un valor que incluye tanto el costo de compra de la tecnología como el costo de la instalación.

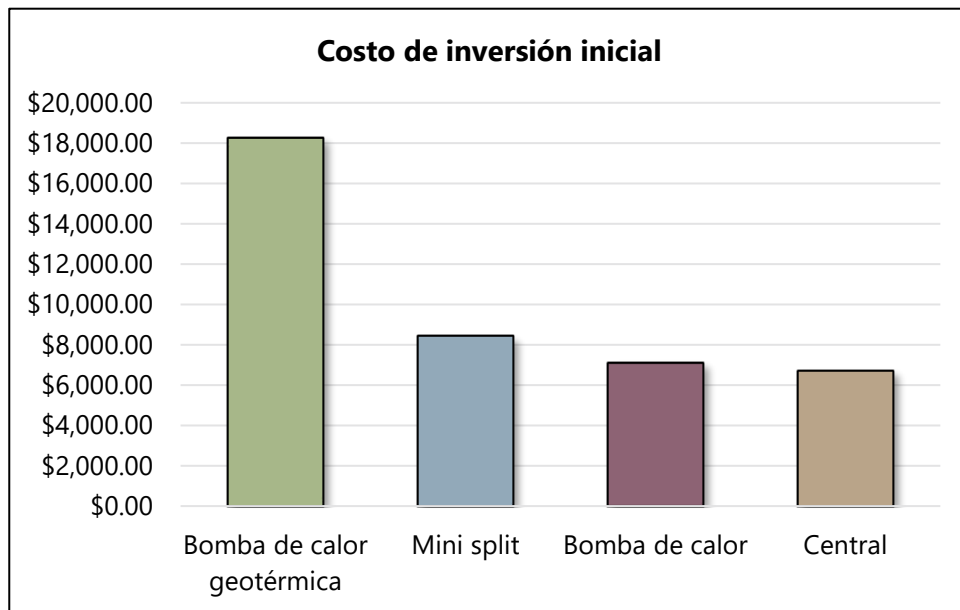


Ilustración 19. Inversión inicial por tipo de sistema de climatización

Fuente: Elaboración propia con datos de (PickHvac, 2021)

La implementación de un sistema de climatización geotérmico cuesta el doble que cualquier otro tipo de sistema de climatización.

5.4.2 COSTOS DE O&M

Se compara el costo de O&M anual para diferentes tipos de acondicionamiento de aire convencionales con los de un sistema de climatización geotérmico en la ilustración 20. Cabe destacar que el costo de operación está directamente ligado al rendimiento del sistema.

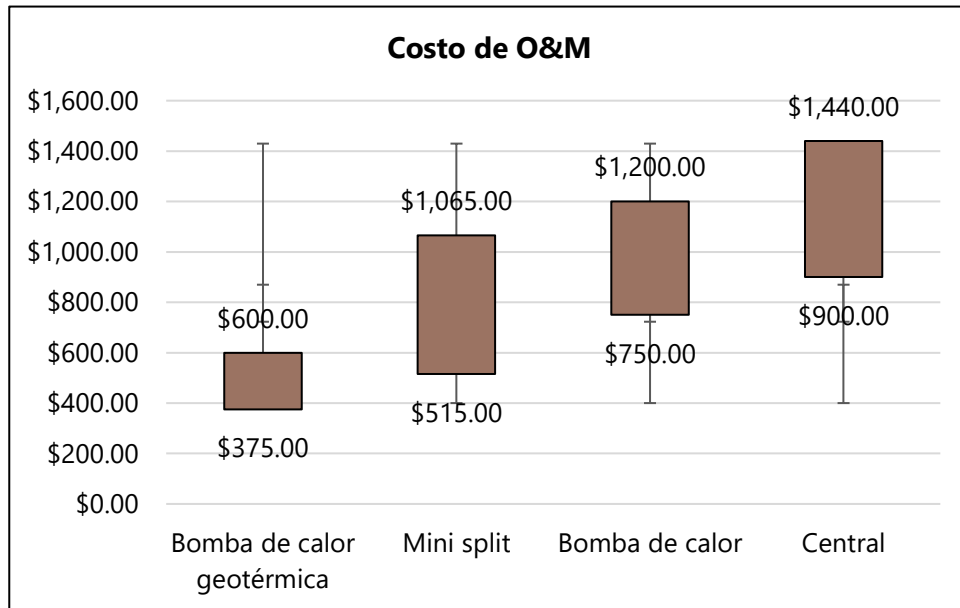


Ilustración 20. Costo de mantenimiento por tipo de sistema de climatización

Fuente: Elaboración propia con datos de (PickHvac, 2021)

Se observa que los sistemas centrales implican un mayor costo anual que el resto. El valor mínimo para el costo de O&M del sistema central es mayor 1.5 veces que el valor máximo de un sistema geotérmico. El sistema con bomba de calor geotérmica posee el rango más bajo en costos de O&M. En promedio, un sistema central gasta \$1,170 en O&M, una bomba de calor de aire gasta \$975, un sistema mini split gasta \$790 y un sistema con bomba de calor geotérmica gasta \$487.50.

5.4.3 VIDA ÚTIL

Se compara el rango de duración de cada tipo de sistema de climatización en la ilustración 21. Se entiende por vida útil el tiempo en que el sistema opera de manera óptima, luego del cual requerirá de reparación y/o reemplazo de alguno o todos sus componentes.

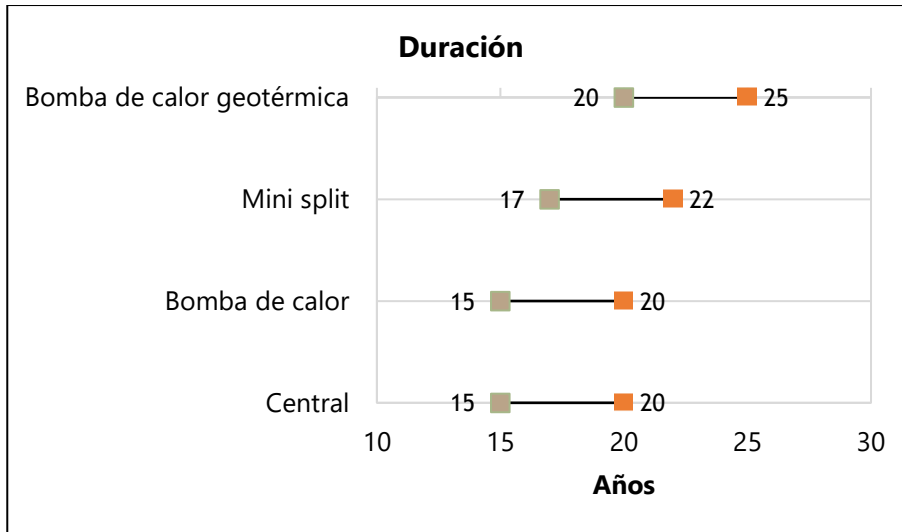


Ilustración 21. Vida útil por tipo de sistema de climatización

Fuente: Elaboración propia con datos de (PickHvac, 2021)

Tanto la bomba de calor de aire como el sistema central tienen una vida útil de entre 15 a 20 años, mientras que el mini split puede durar entre 17 a 22 años. En contraste, el sistema con bomba de calor geotérmica demuestra la vida útil más larga, de entre 20 a 25 años.

5.4.4 RENDIMIENTO

Los sistemas de climatización se diferencian en términos de eficiencia energética, y a partir de los valores de COP y otros indicadores energéticos, se ha determinado un ranking, el cual se ejemplifica en la ilustración 22.

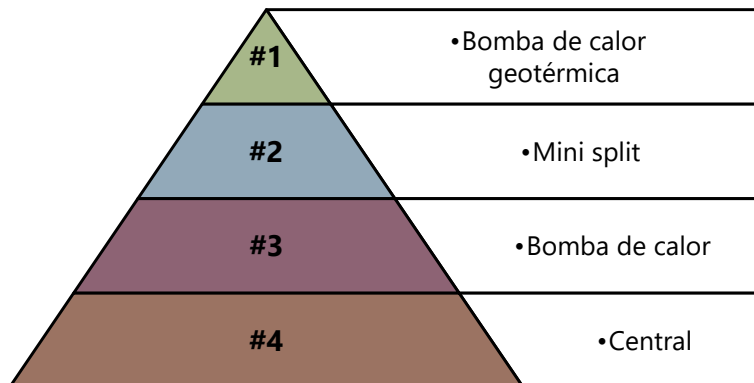


Ilustración 22. Ranking en rendimiento de diferentes sistemas de clasificación

Fuente: Elaboración propia con datos de (PickHvac, 2021)

El sistema con bomba de calor geotérmica se considera que posee el mejor rendimiento, seguido de los sistemas mini split, bomba de calor, y por último los sistemas centrales. Choudhury (2013) reitera que el rendimiento de sistemas de climatización convencionales disminuye con el aumento de la temperatura ambiente, mientras que los sistemas de climatización geotérmicos mantienen su rendimiento ante los cambios de temperatura. La ilustración 23 enfatiza la diferencia del COP típico entre los sistemas convencionales y los geotérmicos ante los cambios de temperatura exterior.

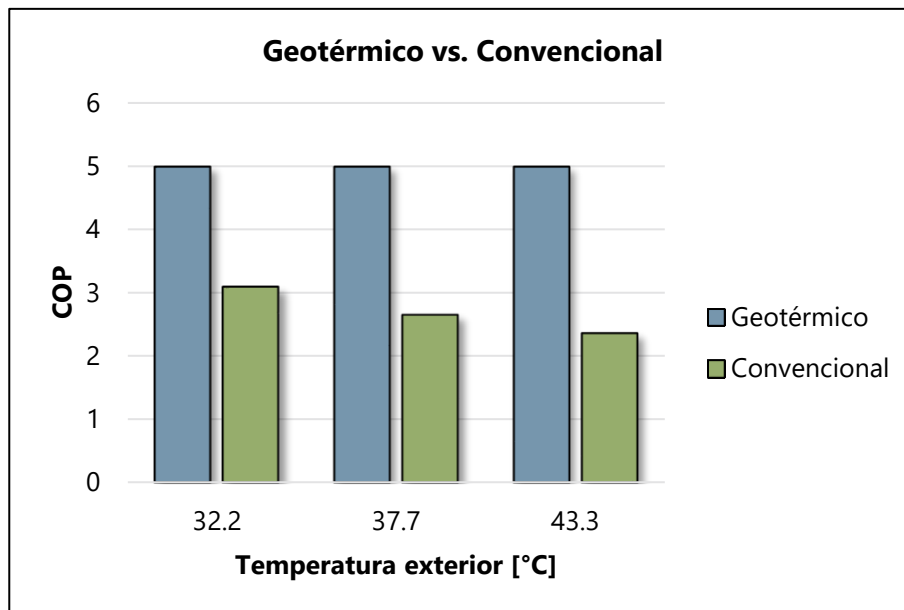


Ilustración 23. COP ante cambio de temperatura

Fuente: Elaboración propia basado en (Choudhury, 2013)

En promedio, el COP de un sistema de climatización geotérmico es de 5 y permanece igual ante los cambios de temperatura exterior; por otro lado, un sistema de climatización convencional presenta un COP inicial de 3 y disminuye hasta 2.35 cuando la temperatura exterior aumenta hasta 43.3 °C.

5.5 ANÁLISIS FINANCIERO

Se estudia el aspecto financiero de la implementación de un sistema de climatización geotérmico, planteando la inversión inicial para un sistema con bomba de calor geotérmica en circuito cerrado

vertical con fan coils. Además, se diferencian los costos implicados en un proyecto, se presenta un cronograma de ejecución, y se establece el periodo de retorno de la inversión inicial.

5.5.1 PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

En la tabla 8 se presentan los precios de los diferentes componentes que se incluyen en el diseño de un sistema de climatización geotérmica. Cabe mencionar que dentro del precio unitario se incluye la tecnología, la mano de obra, las herramientas, entre otros. Ver el Anexo 5 para el desglose de precios unitarios.

Tabla 8. Precios unitarios de diferentes componentes

Concepto	Precio Unitario	Unidad
Sistema vertical	L 23,459.55	Sonda
Sistema horizontal	L 112.76	m ²
Suelo radiante	L 1,553.69	m ²
Radiadores	L 4,071.34	Equipo
Fan coils	L 27,776.81	Equipo
Bomba de calor geotérmica	L 101,130.91	Equipo
Refrigerante R410A	L 572.73	kg
Tubería de polietileno	L 21.84	m

Fuente: Elaboración propia con datos de (CYPE Ingenieros, s.f.)

Entre los sistemas para bucle exterior, el vertical implica un mayor costo unitario que el horizontal, sin embargo, requiere de menos unidades para cumplir con el requerimiento térmico. El suelo radiante tiene el menor costo unitario de instalación, 2.6 veces menos que los radiadores. Tomando en cuenta que la unidad del suelo radiante es el metro cuadrado, y que se necesitaría un equipo radiador por cada espacio definido dentro de la vivienda, el precio unitario de los fan coils resulta más accesible.

El sistema de climatización geotérmico considerado para el presupuesto se compone de un sistema vertical de dos sondas de 50 m de profundidad con doble tubería de polietileno de alta densidad, un sistema de fan coils horizontal de dos ductos de 5.7 kW de potencia frigorífica, y una bomba de calor geotérmica de 7 kW de potencia calorífica con un COP de 4.6 y 5 kW de potencia frigorífica con un COP de 3.16, el cual requiere una carga de 3 kg de refrigerante R410A.

La tabla 9 indica los componentes, la cantidad y los montos totales para la inversión inicial del sistema de climatización geotérmico.

Tabla 9. Presupuesto de inversión de sistema de climatización geotérmico

Concepto	Precio unitario	Unidad	Cantidad	Monto en lempiras	Monto en dólares
Sistema vertical	L 23,459.55	Sonda	2	L 46,919.10	\$ 1,948.56
Fan coils	L 27,776.81	Equipo	1	L 27,776.81	\$ 1,153.58
Bomba de calor geotérmica	L 101,130.91	Equipo	1	L 101,130.91	\$ 4,200.00
Refrigerante R410A	L 572.73	kg	3	L 1,718.19	\$ 71.36
Total				L 177,545.01	\$ 7,373.50

Fuente: Elaboración propia con datos de (CYPE Ingenieros, s.f.)

La inversión inicial del sistema de climatización geotérmico supuesto es de L 177,545.01, o \$7,373.50. En la ilustración 24 se muestra el porcentaje del costo total por cada componente.

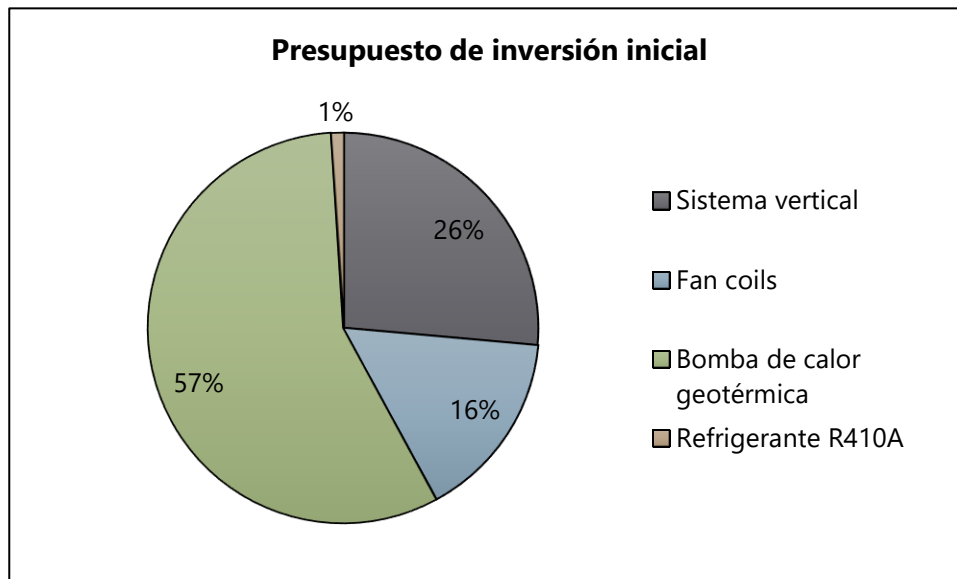


Ilustración 24. Porcentaje del presupuesto por componente

Fuente: Elaboración propia

La mayor parte del presupuesto se destina a la bomba de calor geotérmica con un 57%. El segundo costo más grande es el sistema cerrado vertical con un 26% (la teoría indica que el costo del bucle exterior es aproximadamente 30% del total). La instalación de los fan coils representa un 16% de la inversión, mientras que la carga de refrigerante sólo es un 1%.

5.5.2 DETERMINACIÓN DE COSTOS

El costo de inversión inicial es de carácter único, por otra parte, existen otros costos que se deben considerar una vez que el sistema de climatización geotérmico sea instalado.

5.5.2.1 Costos de O&M

La operación implica un consumo de energía eléctrica; el mantenimiento de los componentes requieren de inversiones para asegurar el funcionamiento óptimo del proyecto. En la tabla 10 se plantean los costos de O&M para el sistema de climatización geotérmico supuesto para el presupuesto de inversión inicial. Nótese que algunos costos se estiman decenal, es decir, es un desembolso realizado luego de 10 años de operación.

Tabla 10. Costos de O&M de sistema de climatización geotérmico

Concepto	Costo mensual	Costo anual en lempiras	Costo anual en dólares
Consumo de electricidad	L 436.38	L 5,236.59	\$217.48
	Costo decenal	Costo anual en lempiras	Costo anual en dólares
Recarga de refrigerante	L 45.82	L 4.58	\$0.19
Sistema vertical	L 1,642.17	L 164.22	\$6.82
Bomba de calor geotérmica	L 64,723.28	L 6,472.33	\$268.80
Fan coils	L 7,777.51	L 777.75	\$32.30
Total		L 12,655.47	\$525.59

Fuente: Elaboración propia con datos de (CYPE Ingenieros, s.f.)

El costo anual total de O&M para el sistema de climatización geotérmico es de L 12,655.47, o \$525.59. Cabe mencionar que el consumo de energía eléctrica es aproximadamente 97.83 kWh al mes y la tarifa de energía eléctrica vigente por la EEH es de L 4.4608/kWh.

5.5.2.2 Costos financieros

El capital de inversión requiere de un financiamiento mediante préstamo bancario por el valor determinado para satisfacer el presupuesto de inversión inicial. Durante el plazo del préstamo, desde 6 hasta 10 años, se deberá desembolsar los pagos con intereses. La tasa de interés puede ser baja, de 6 a 12%, ya que el proyecto involucra una energía renovable. (Dufresne, Langlois, Couture-Roy, Flamand, & Nour, 2012)

5.5.3 CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

Se presenta un cronograma de ejecución para la implementación de un sistema de climatización geotérmico en la tabla 11.

Tabla 11. Cronograma de ejecución de proyecto

Actividades	Semanas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Determinación de carga térmica de vivienda	■	■	■					
Estudio de temperatura anual del sitio		■	■					
Estudio del suelo del sitio		■	■					
Selección de bomba de calor geotérmica				■				
Selección de tipo de sistema para bucle exterior				■				
Selección de sistema para bucle interior				■				
Instalación del sistema de climatización geotérmica					■	■	■	
Puesta en marcha y medición del rendimiento							■	■
Determinación de ahorro energético								■

Fuente: Elaboración propia

El proyecto se puede desarrollar en aproximadamente dos meses, considerando que durante el primer mes se realiza un estudio de factibilidad para la vivienda y durante el segundo mes se instala la tecnología, se pone en marcha el sistema y se mide su rendimiento para determinar el ahorro energético obtenido.

5.5.4 PERIODO DE RETORNO DE CAPITAL

La ilustración 25 muestra el flujo de fondos del proyecto durante los primeros 10 años de implementación del sistema de climatización geotérmico supuesto. En el Anexo 6 se detalla el flujo de fondos del proyecto, sin tomar en cuenta los costos financieros.

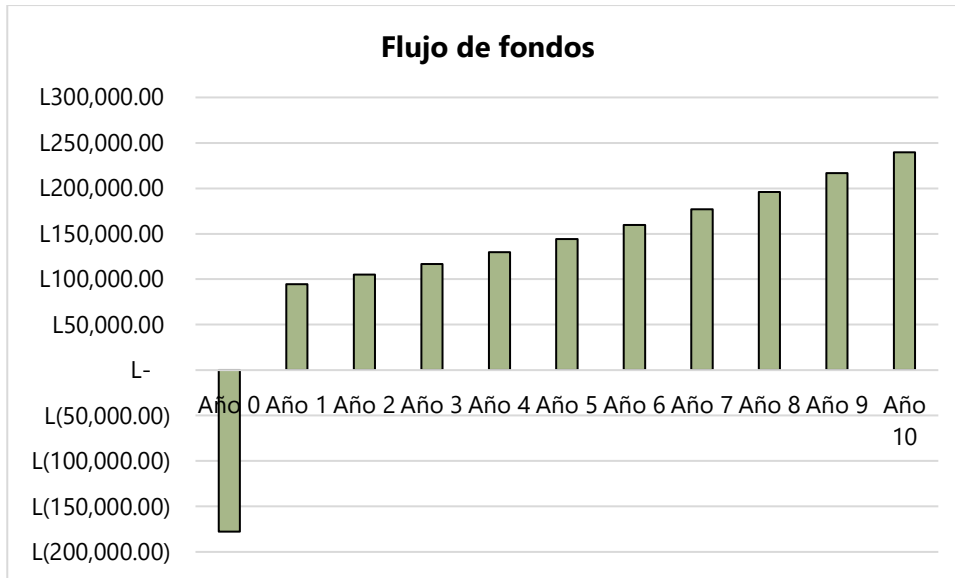


Ilustración 25. Flujo de fondos de proyecto

Fuente: Elaboración propia

Se estima que en 7 años se recuperaría la inversión inicial. El año 0 se considera el año de implementación, pero desde el primer año se observa que los ahorros en los costos por energía eléctrica obtenidos debido a la utilización del sistema de climatización geotérmico en vez de un sistema de acondicionamiento de aire convencional son positivos.

VI. CONCLUSIONES

Se determinó que la implementación de un sistema de climatización geotérmico es técnicamente factible porque la tecnología de bomba de calor geotérmica funciona para las condiciones de temperatura y propiedades del suelo en Honduras, y es económicamente factible porque es un proyecto sostenible y se puede recuperar la inversión; por lo tanto, el proyecto de climatización con geotermia es viable.

1. El funcionamiento termodinámico de un sistema de climatización geotérmico es el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, ocurriendo un intercambio de calor mediante la convección entre la tierra y el aire del interior de la edificación. Sus componentes son la bomba de calor geotérmica, el bucle interior, el bucle exterior y el refrigerante.
2. La temperatura media anual en San Pedro Sula y La Ceiba significa un mejor rendimiento de funcionamiento de un sistema de climatización geotérmica, mientras que la temperatura media anual en Tegucigalpa se acerca al confort térmico, y por ende no demostraría un rendimiento óptimo. En las tres ciudades se encuentra un tipo de suelo favorable para el intercambio de calor, y cabe destacar que los suelos de San Pedro Sula y La Ceiba presentan una mejor transmisividad que posibilita la implementación de un sistema abierto.
3. Se determinó que un proyecto de implementación de un sistema de climatización geotérmico tendría mejor rendimiento bajo las condiciones meteorológicas, geológicas e hidrogeológicas en San Pedro Sula y La Ceiba, es decir, en zonas cálidas del país. Para Tegucigalpa se diseña un sistema cerrado vertical, para San Pedro Sula y La Ceiba se considera que un sistema cerrado o abierto vertical es técnicamente factible, y la opción de sistema cerrado horizontal es una opción en La Ceiba, ya que en esta ciudad las viviendas pueden tener más espacio disponible. Para el bucle interior se establece que los fan coils son la mejor opción para instalaciones existentes, mientras que en instalaciones nuevas puede ser el suelo radiante.
4. Un sistema de climatización geotérmico tiene alto costo de inversión inicial, sin embargo, tiene un menor costo de O&M, una mayor vida útil y un mayor rendimiento que los sistemas convencionales. El geotérmico utiliza una fuente de energía renovable, mientras que los convencionales aportan emisiones de GEI y contaminación térmica al ambiente.

5. Implementar un sistema de climatización geotérmica de 7 kW requiere de una inversión inicial de \$7,373.50, siendo el componente más costoso la bomba de calor geotérmica, y se completa la instalación en dos meses. En costos de O&M se estiman de \$525.59 y los costos financieros se refieren a los pagos del préstamo bancario que se solicite para la inversión inicial. Debido a que el capital de inversión inicial se recupera en 7 años, que sería tan sólo el 28% de la vida útil de la instalación, el proyecto es económicamente factible.

VII. RECOMENDACIONES

1. El estudio de tecnologías verdes para el acondicionamiento de aire en edificaciones puede significar una oportunidad diferente para desarrollo de proyectos de energía renovable, como los pozos provenzales y la climatización solar.
2. Es necesario conocer el potencial que existe en todo Honduras para la implementación de un sistema de climatización geotérmico. Además, se requiere de mediciones de la temperatura del suelo durante un año por lo menos en las ciudades más importantes del país, para obtener una caracterización de la temperatura en función de la profundidad durante las diferentes estaciones del año.
3. Adicional al diseño de un sistema de climatización geotérmico se puede implementar un acumulador para producción de ACS, aprovechando el bucle exterior e instalando un sistema de distribución para la vivienda, y un sistema fotovoltaico para generación de electricidad a partir de energía solar, de manera que el proyecto sea completamente autónomo y renovable.
4. Se requiere el análisis de un caso de estudio de un proyecto de implementación de un sistema de climatización geotérmico en Honduras para comparar los posibles ahorros energéticos en el caso de implementar un sistema convencional para el acondicionamiento del aire.
5. La investigación e implementación de proyectos residenciales con energías renovables, incluyendo la geotermia, presenta un atraso en su desarrollo debido a la falta de reglamentación y programas financieros que impulsen la inversión, limitando el alcance del estudio financiero.

VIII. APLICABILIDAD

El proyecto tiene un potencial de aplicabilidad en el área de desarrollo de usos directos de la energía geotérmica en Honduras, no sólo en el sector residencial, sino también en el sector comercial e industrial. La climatización de espacios es un proceso que consume mucha energía y recursos, por lo que se presenta este análisis como una oportunidad de mejoramiento, que implica un paso hacia la sostenibilidad.

Desde la perspectiva de los ODS, se anticipa que el proyecto aporta al séptimo objetivo: "garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos" (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), s.f.). El aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía es un ejemplo de energía asequible y no contaminante, porque la tecnología se puede implementar en cualquier parte del mundo y su uso contribuye a la reducción de emisiones de GEI. Así, el objetivo 13 está directamente ligado, ya que establece una adopción de medidas que combatan el cambio climático y sus efectos.

Dado que el aprovechamiento directo de la energía geotérmica tiene poca legislación en el país, existe una expectativa que cuando brote el mercado de las ESE, se incluya la opción de sistemas de climatización geotérmicos en el desarrollo de proyectos. El repertorio no estaría limitado a instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos. En cambio, se enfatiza el hecho de que existen otras fuentes de energía renovable cuyo potencial aún no ha sido explorado.

IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL

El siguiente paso en el análisis de la viabilidad de la implementación de sistemas de climatización con geotermia de muy baja entalpía consiste en desarrollar un caso de estudio, de manera que se pueda comparar resultados reales y simulados con los datos teóricos expuestos en este proyecto. Primero se deberá analizar la carga térmica de una vivienda ubicada en una de las tres ciudades estudiadas, a la vez recopilando los datos meteorológicos y geológicos del sitio. Así, se determinarán las tecnologías a implementar en el sistema de climatización geotérmico. Una vez seleccionados los componentes, se deberá realizar un estudio financiero. Se recomienda la utilización del software Insight 360 incorporado en el programa Revit de Autodesk para realizar la simulación de la implementación de un sistema de climatización geotérmico. Además, el trabajo se puede complementar con un análisis energético, financiero y de emisiones de CO₂ usando el software RETScreen.

Esta segunda etapa demostraría la aplicabilidad teórica presentada en este proyecto, indagando en las interrogantes que surgieron a lo largo de la investigación: ¿cómo se calcula la carga térmica de una vivienda para un sistema de climatización?, ¿cuál es el ahorro energético obtenido con un sistema de climatización geotérmico implementado en una vivienda?, ¿cuánto CO₂ se deja de emitir tras la instalación de una bomba de calor geotérmica?

Más aún, se puede expandir el análisis con un sistema de ACS al par del sistema de climatización geotérmica, aprovechando el bucle exterior y considerando una bomba de calor geotérmica con un acumulador incorporado. ¿Implicaría esta adición un mayor presupuesto de inversión inicial? ¿Mejoraría el rendimiento?

Finalmente, dentro del trabajo futuro se considera el diseño de un sistema solar fotovoltaico que alimente con energía eléctrica la bomba de calor geotérmica, de manera que el sistema de climatización sea completamente autónomo. ¿La sostenibilidad del proyecto final vale el costo de inversión inicial?

BIBLIOGRAFÍA

- AIRZONE. (14 de Septiembre de 2016). *QUÉ ES UN FAN COIL Y CÓMO FUNCIONA ESTE EQUIPO*.
Obtenido de AIRZONE: <http://www.airzone.es>
- Argeñal, F. J. (2010). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Secretaria de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SERNA). Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <http://www.repositorio.credia.hn>
- Beltrán, R. (2020). Sistemas de acondicionamiento de aire. En R. E. Villazón Godoy, *Sistemas de habitabilidad: principios técnicos del proyecto de arquitectura* (Primera ed., págs. 311-344). Bogotá, Colombia: Ediciones Uniandes-Universidad de los Andes. Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de <https://uniandes.edu.co>
- Bonilla, H. G. (2020). *Eficiencia Energética en Industrias*. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de INEL Engineering Education: <http://www.inelinc.com>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (Séptima ed.). México D. F.: Mc Graw Hill.
- Choudhury, A. (2013). HVAC vs Geothermal Heat Pump—Myth & Truth. *Open Journal of Energy Efficiency*, II(1), 42-45. doi:10.4236/ojee.2013.21007
- Clausius. (s.f.). *CLAUSIUS CLASSIC*. Obtenido de Clausius Universidad de Vigo: <https://www.clausius.es>
- Coowor. (s.f.). *Deron ground heating system ground source heat pump-ce geothermal ground source heat pump*. Obtenido de Coowor: <https://deron.coowor.com>
- Córdoba Padilla, M. (2011). *Formulación y evaluación de proyectos*. Eceo Ediciones. Recuperado el 9 de Febrero de 2021, de <https://elibro.net>
- CYPE Ingenieros. (s.f.). *Instalaciones*. Recuperado el 23 de Febrero de 2021, de Generador de Precios. Espacios Urbanos. Honduras: <http://www.honduras.generadordeprecios.info>

- Departamento Técnico de Saleplas. (29 de Enero de 2018). *Saleplas fabrica sondas, colectores y accesorios para geotermia*. Obtenido de Canales Sectoriales Interempresas: <https://www.interempresas.net>
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). What is Geothermal Energy? *Istituto di Geoscienze e Georisorse*. Recuperado el 5 de Febrero de 2021
- Dirección General de Biodiversidad. (2000). *Primer Informe Nacional Sobre La Implementación De La Convención De Desertificación En Honduras*. Informe de País, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA), Dirección General de Biodiversidad, Tegucigalpa. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <http://www.desastres.hn>
- Dufresne, V., Langlois, P., Couture-Roy, M., Flaman, S., & Nour, S. (2012). *Programas de Financiamiento de Eficiencia Energética: conceptos básicos*. Econoler Incorporated. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Recuperado el 24 de Febrero de 2021, de <https://publications.iadb.org>
- ECODIST. (2021). *Radiadores de baja temperatura*. Obtenido de ECODIST: <https://www.ecodist.es>
- ECOFORREST. (s.f.). *Bombas de calor ECOFOREST ecoGEO*. Obtenido de ECOFOREST: <http://www.ecoforest.es>
- EN ESTADO CRUDO. (24 de Mayo de 2019). Pozo canadiense, una solución bioclimática para climatizar el hogar de forma sostenible. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <https://www.enestadocrudo.com>
- ENERTES. (s.f.). *Bombas de calor geotérmicas*. Obtenido de ENERTES: <https://enertres.com>
- Franke, M. H., & Nakagawa, M. (13 de Febrero de 2017). How Direct-use Geothermal Systems Could Be Used to Meet the United Nations Sustainable. *Proceedings 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-13. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://pangea.stanford.edu>
- Friolandia Service. (13 de Enero de 2019). *¿Cuáles son las presiones del Refrigerante 410A?* Obtenido de FRIOLANDIA: <https://www.friolandiaservice.com>

- Garcia, M. A., Flores, W. C., & Sandoval, S. A. (2017). Geochemical Exploration in Southern Honduras. *GRC Transactions*, 48, 1-12. Recuperado el 10 de Febrero de 2021, de <https://www.academia.edu>
- Garrigues Medio Ambiente. (2010). *Guía sobre Empresas de Servicios Energéticos (ESE)*. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <http://www.fenercom.com>
- Glassley, W. E. (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment* (Segunda ed.). (A. Ghassemi, Ed.) Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/b17521
- Gutiérrez, A. G., & Estrella, I. M. (Julio de 2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. (L. C. Negrín, Ed.) *Geotermia - Revista Mexicana de Geotermia*, 25(2), 58-68. Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de <https://www.geotermia.org.mx>
- Henríquez Banegas, W. A. (26 de Diciembre de 2011). Análisis del potencial, mercado y tecnologías de los recursos geotermales en Honduras. *United Nations University Reports*, 26(12), 203-222. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <https://orkustofnun.is>
- Henríquez, W. A. (26 de Abril de 2020). Current Status of Geothermal Development in Honduras. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1-11. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://www.geothermal-energy.org>
- Iannelli, L., Fiora, J., & Gil, S. (Junio de 2013). La tierra como acondicionador de aire. *Petrotecnica*, LIV, 34-41. Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de <http://www.petrotecnica.com.ar>
- Johannesson, T., Gudmundsson, Y., & Gudmundsdottir, K. (2 de November de 2016). Geothermal Space Cooling. *Proceedings 6th African Rift Geothermal Conference*, 1-8. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://www.geothermal-energy.org>
- Liu, X., Polsky, Y., Qian, D., & McDonald, J. (11 de Febrero de 2019). An Analysis on Cost Reduction Potential of Vertical Bore Ground Heat Exchangers Used for Ground Source Heat Pump Systems. *Proceedings 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-15. Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://pangea.stanford.edu>

- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct Utilization of geothermal energy 2020 Worldwide review. *Geothermics*, 90, 1-31. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101915
- Navarro-Racines, C., Monserrate, F., Llanos-Herrera, L., Obando, D., & Córdoba, J. (2018). *Desarrollo de los Escenarios Climáticos de Honduras y Módulo Académico de Capacitación*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Dirección Nacional de Cambio Climático de MiAmbiente. Recuperado el 9 de Febrero de 2021, de <https://aguadehonduras.gob.hn>
- NIBE. (s.f.). *BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS*. Obtenido de NIBE Web: <https://www.nibe.eu>
- Ochoa Álvarez, R., Mejía, O., & Portillo, R. (1989). *Mapa Hidrogeológico de la República de Honduras*. Instituto Geográfico Nacional; Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA); Organización para el Desarrollo de Ultramar; Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, Tegucigalpa. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <http://bvirtual.infoagro.hn>
- Pahud, D. (2002). *Geothermal energy and heat storage*. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Dipartimento Costruzioni e Territorio. Cannobio: SUPSI DCT LEEE. Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <https://repository.supsi.ch>
- Pérez, M. E., Perietti, A., & Francisca, F. M. (2018). Energía Geotérmica de Baja Entalpía en Suelos Loésicos: Cálculo y Diseño para Caso de Estudio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 23-34. Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de <http://portalderevistas.unsa.edu.ar>
- Pesce, A. H. (1994). *Energía geotérmica: Promisoria alternativa*. Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico. Buenos Aires: Secretaría de Minería. Recuperado el 3 de Febrero de 2021, de <repositorio.segemar.gov.ar>
- PickHvac. (2021). *Best HVAC Systems Types in 2021*. Obtenido de PickHvac: Cooling & Heating Guide: <https://www.pickhvac.com>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (s.f.). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD): <https://www.undp.org>
- Programa Fomento de la Geotermia en Centroamérica. (2019). *GEOTERMIA EN HONDURAS. Un análisis de necesidades*. Artículo, Cooperación Alemana, Tegucigalpa. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <https://www.giz.de>
- Rey Martínez, F. J. (2005). *Bombas de calor y energías renovables en edificios*. Madrid, España: Editorial Paraninfo. Recuperado el 7 de Febrero de 2021
- Rosales Posas, R. (2005). *La formulación y la evaluación de proyectos* (Quinta ed.). San José, Costa Rica. Recuperado el 9 de Febrero de 2021, de <https://editorial.uned.ac.cr>
- Sarmiento R., J. A., Garzón A., D. M., & Gutiérrez-Junco, Ó. J. (2019). *Formulación y evaluación de proyectos de ingeniería*. Editorial UPTC. Recuperado el 9 de Febrero de 2021, de <https://elibro.net>
- Simons, C. S. (1969). *Los Suelos de Honduras*. Informe al Gobierno de Honduras, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de <http://www.fao.org>
- Stober, I., & Bucher, K. (2013). History of Geothermal Energy Use. En I. Stober, & K. Bucher, *Geothermal Energy* (págs. 15-24). Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-13352-7_2
- TERRAPILAR. (s.f.). *¿Qué debo saber sobre los suelos radiantes?* Obtenido de TERRAPILAR: <https://www.terrapilar.com>
- Trillo, G. L., & Angulo, V. R. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Madrid: Móstoles. Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de <http://www.madrid.org>
- Vaidya, D., Shah, M., Sircar, A., & Sahajpal, S. (13 de Febrero de 2017). Space Heating and Cooling Application Based on Low Enthalpy Geothermal Reservoirs with a Focus on India

Subcontinent. *Proceedings 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1-5.

Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://pangea.stanford.edu>

Vaillant. (s.f.). *¿Por qué Vaillant?* Obtenido de Vaillant: <http://www.vaillant.es>

Yousefi, H., Noorollahi, Y., Abedi, S., Panahian, K., MirAbadi, A. H., & Abedi, S. (19 de Abril de 2015).

Economic and Environmental Feasibility Study of Greenhouse Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump in Northwest Iran. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1-7.

Recuperado el 6 de Febrero de 2021, de <https://www.geothermal-energy.org>

ANEXOS

Anexo 1. COP con ciclo termodinámico

Se puede calcular el COP de una bomba de calor geotérmica mediante el análisis del ciclo termodinámico. En la ilustración 26 se muestra el diagrama P-h del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el cual muestra el comportamiento de la presión y la entalpía en cada etapa.

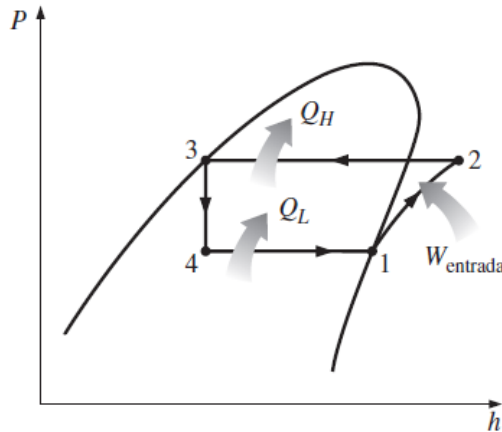


Ilustración 26. Diagrama P-h ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

El procedimiento matemático para obtener el COP de calefacción y de refrigeración procede de la ecuación de energía de flujo estacionario y detalla a continuación.

$$(Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) = m_f \cdot (h_{sal} - h_{ent})$$

Ecuación 4. Principio de conservación de la energía

Recuérdese las ecuaciones 2 y 3 para calcular el COP de calefacción y de refrigeración.

$$Q_{CO} = W + Q_{EV}$$

Ecuación 5. Sistema de ciclo cerrado

$$W = m_f \cdot (h_2 - h_1)$$

Ecuación 6. Potencia del compresor

$$Q_{EV} = m_f \cdot (h_1 - h_4)$$

Ecuación 7. Calor absorbido en el evaporador

$$Q_{CO} = m_f \cdot (h_2 - h_3)$$

Ecuación 8. Calor liberado en el condensador

Donde m_f es el flujo másico de refrigerante de la bomba de calor geotérmica en kg/s; h_1 es la entalpía del refrigerante antes de entrar al compresor en kJ/kg; h_2 es la entalpía en la salida del compresor; h_3 es la entalpía después de liberar calor en el condensador, y el igual a h_4 durante el estrangulamiento en la válvula de expansión. Los valores de entalpía específica se obtienen de la tabla del fabricante del refrigerante en función de la presión.

Anexo 2. Algunos fabricantes

Se presentan algunos fabricantes originarios de diferentes países de bombas de calor geotérmicas y su gama de modelos para el sector residencial.

- Fabricante: IDM
Origen: Austria
Modelo residencial: TERRA iPUMP T



Ilustración 27. Bomba geotérmica TERRA iPUMP T

Fuente: (ENERTES, s.f.)

- Fabricante: Vaillant
Origen: Alemania
Modelo: geoTHERM



Ilustración 28. Bomba geotérmica geoTHERM

Fuente: (Vaillant, s.f.)

- Fabricante: Clausius
Origen: España
Modelo: Classic



Ilustración 29. Bomba geotérmica Clausius Classic

Fuente: (Clausius, s.f.)

- Fabricante: ECOFOREST
Origen: España
Modelo: ecoGEO



Ilustración 30. Bomba geotérmica ecoGEO

Fuente: (ECOFOREST, s.f.)

- Fabricante: NIBE
Origen: Suecia
Modelo: F1155



Ilustración 31. Bomba geotérmica NIBE F1155

Fuente: (NIBE, s.f.)

Anexo 3. Cálculos del sistema

La potencia del sistema de climatización geotérmica se calcula determinando primero la carga térmica de la vivienda.

$$Q_T = Q_c + Q_v + Q_s + Q_i$$

Ecuación 9. Carga térmica total

$$Q_c = \sum_j (U \cdot A)_j \cdot \Delta T$$

Ecuación 10. Cargas por transmisión

Donde U es la transmisividad del material j de la envolvente; A es el área de la envolvente; y ΔT es la diferencia de temperatura exterior e interior.

$$Q_v = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \Delta T$$

Ecuación 11. Cargas por ventilación e infiltración

Donde ρ es la densidad del aire; C_p es el calor específico del aire; y V es el flujo volumétrico del aire.

$$Q_s = \left[\sum_j \alpha_o \cdot R_{sc} \cdot U_o \cdot A_{o,j} \cdot I_j \cdot (1 - FS) \right] + \left[\sum_j \tau \cdot A_{v,j} \cdot I_j \cdot (1 - FS) \cdot FM \right]$$

Ecuación 12. Cargas por ganancias solares

Donde α es la absorbanza radiactiva del material j de la envolvente; R_{sc} es la resistencia de la superficie del material j; U_o es el coeficiente de transferencia del material; A_o es el área de la superficie j; I_j es la irradiancia solar; FS es el porcentaje de sombra de la ventana; τ es la transmisividad de radiación de la ventana; y FM es el porcentaje de la ventana con respecto al marco.

$$Q_i = \frac{136 + 2.2 \cdot A_T + 22 \cdot N_p}{24}$$

Ecuación 13. Cargas internas

Donde A_T es el área de la vivienda y N_p es el número de personas que la habitan.

También se calcula la longitud de la tubería de polietileno necesaria para satisfacer el requerimiento térmico del sistema.

$$L = \frac{Q_{co}}{I \cdot U_g \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta T}$$

Ecuación 14. Longitud de tubería

Donde D es el diámetro exterior de la tubería; I es la interferencia térmica entre los tubos; y U_g es el coeficiente global de transferencia de calor. Cabe mencionar que la longitud de la tubería se determina con la potencia del condensador, ya que si el sistema puede cumplir con el régimen de calefacción, podrá funcionar durante la refrigeración.

Anexo 4. Escalas de ponderación tabla 5, 6 y 7

Tabla 12. Escala de ponderación para ubicación de proyecto

Factores/Ponderación	2	4	6	8	10
Temperatura media anual [°C]	Menor diferencia de temperatura			Mayor diferencia de temperatura	
Conductividad térmica [W/mK]	Menor conductividad			Mayor conductividad	
Capacidad térmica [MJ/m ³ K]	Mayor capacidad			Menor capacidad	
Permeabilidad [m/día]	Menor permeabilidad			Mayor permeabilidad	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Escala de ponderación para bucle exterior

Factores/Ponderación	2	4	6	8	10
Costo de instalación	Mayor costo			Menor costo	
Utilización de espacio	Mayor espacio			Menor espacio	
Necesidad de agua	Utiliza agua			No utiliza agua	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Escala de ponderación para bucle interior

Factores/Ponderación	2	4	6	8	10
Costo de instalación	Mayor costo			Menor costo	
Eficiencia	Menor eficiencia			Mayor eficiencia	
Costo de mantenimiento	Mayor costo			Menor costo	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Desglose de precios unitarios

Tabla 15. Cotización sistema vertical

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	Ud	Sonda geotérmica para instalación vertical, de 50 m de longitud y 96 mm de diámetro, formada por un tubo de polietileno de alta densidad (PE 100) de 32 mm de diámetro y 2,9 mm de espesor, SDR11, y un pie con forma de V, al que se sueldan los tubos, peso de la sonda 123,75 kg, temperatura de trabajo entre -20 °C y 30 °C, suministrada en rollos.	1.000	6735.40	6735.40
	m	Tubo de inyección, de polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE), de 25 mm de diámetro exterior y 2,3 mm de espesor, para relleno de sonda geotérmica vertical.	52.000	32.75	1703.00
	Ud	Distanciador para tubos, 2 x 32 mm, con orificio central de 45 mm de diámetro para guiado del tubo de inyección, para sonda geotérmica vertical.	7.000	116.22	813.54
	kg	Mortero preparado de bentonita y cemento, de conductividad térmica mínima 2,35 W/(mK), baja permeabilidad al agua, resistente a heladas, densidad 1800 kg/m ³ , resistencia mecánica a compresión 10 N/mm ² , para inyección y relleno de sonda geotérmica vertical.	900.000	15.08	13572.00
			Subtotal materiales:		22823.94
2		Mano de obra			
	h	Instalador de calefacción.	1.382	73.85	102.06
	h	Ayudante de instalador de calefacción.	1.382	53.23	73.56
			Subtotal mano de obra:		175.62
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	22999.56	459.99
		Coste de mantenimiento decenal: L 1.642,17 en los primeros 10 años.	Costos directos (1+2+3):		23459.55

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 16. Cotización sistema horizontal

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	m ³	Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	0.200	293.43	58.69
	m	Tubo de polietileno PE 100, de 20 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor, SDR11, PN=16 atm, con el precio incrementado el 10% en concepto de accesorios y piezas especiales.	2.000	20.34	40.68
			Subtotal materiales:		99.37
2		Mano de obra			
	h	Instalador de calefacción.	0.088	73.85	6.50
	h	Ayudante de instalador de calefacción.	0.088	53.23	4.68
			Subtotal mano de obra:		11.18
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	110.55	2.21
		Coste de mantenimiento decenal: L 33,83 en los primeros 10 años.	Costos directos (1+2+3):		112.76

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 17. Cotización suelo radiante

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	m	Banda de espuma de polietileno (PE), de 200 x 10 mm	0.600	91.76	55.06
	m ²	Panel de tetones de poliestireno expandido (EPS) y recubrimiento termo conformado de polietileno (PE), aislante a ruido de impacto, de 1350 x 750 mm y 43 mm de espesor, paso del tubo múltiplo de 7,5 cm, válido para tubo de 16 a 20 mm de diámetro, con unión entre planchas por traslape para evitar puentes térmicos y filtraciones de mortero.	1.000	872.27	872.27
	m	Tubo de polietileno reticulado (PE-X a) con barrera de oxígeno y capa de protección de polietileno (PE) modificado, de 20 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor según ISO 15875-2.	4.444	72.88	323.88
	m ³	Mortero autonivelante, con resistencia a compresión de 20 N/mm ² , resistencia a flexión de 4 N/mm ² , a base de sulfato cálcico, para espesores de 2,5 a 7,0 cm, usado en nivelación de pisos.	0.040	4040.02	161.60
	m ³	Agua.	0.004	32.32	0.13
			Subtotal materiales:		1412.94
2		Equipo y maquinaria			
	h	Mezcladora-bombeadora para morteros autonivelantes.	0.050	197.63	9.88
			Subtotal equipo y maquinaria:		9.88
3		Mano de obra			
	h	Instalador de calefacción.	0.736	73.85	54.35
	h	Ayudante de instalador de calefacción.	0.736	53.23	39.18
	h	Aplicador de mortero autonivelante.	0.055	71.73	3.95
	h	Ayudante de aplicador de mortero autonivelante.	0.055	53.32	2.93
			Subtotal mano de obra:		100.41
4		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	1523.23	30.46
Coste de mantenimiento decenal: L 77,68 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3+4):		1553.69

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 18. Cotización fan coils

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	Ud	Fan coils horizontal sin envolvente, equipado con plenum de impulsión simple, sistema de dos tubos, potencia frigorífica total nominal de 5,7 kW (temperatura húmeda de entrada del aire: 19 °C; temperatura de entrada del agua: 7 °C, salto térmico: 5 °C), potencia calorífica nominal de 6,02 kW (temperatura de entrada del aire: 20 °C; temperatura de entrada del agua: 50 °C), de 3 velocidades, caudal de agua nominal de 1,14 m ³ /h, caudal de aire nominal de 850 m ³ /h, presión de aire nominal de 33 Pa y potencia sonora nominal de 54 dB; incluso transporte hasta pie de obra sobre camión.	1.000	21191.30	21191.30
	Ud	Kit de soportes para suspensión del techo, formado por cuatro varillas roscadas de acero galvanizado, con sus tacos, tuercas y arandelas correspondientes.	1.000	787.28	787.28
	Ud	Válvula de tres vías con bypass (4 vías), con actuador; incluso conexiones y montaje.	1.000	4115.34	4115.34
	Ud	Válvula de esfera de latón niquelado para roscar de 3/4".	2.000	157.06	314.12
			Subtotal materiales:		26408.04
2		Mano de obra			
	h	Instalador de climatización.	6.370	75.05	478.07
	h	Ayudante de instalador de climatización.	6.370	54.32	346.02
			Subtotal mano de obra:		824.09
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	27232.13	544.64
Coste de mantenimiento decenal: L 7.777,51 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3):		27776.77

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 19. Cotización radiador

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	Ud	Elemento para radiador de aluminio inyectado en instalaciones de agua caliente hasta 6 bar y 110 °C, de 425 mm de altura, con frontal plano y emisión calorífica 74,7 kcal/h para una diferencia media de temperatura de 50 °C entre el radiador y el ambiente.	6.000	418.69	2512.14
	Ud	Kit para montaje de radiador de aluminio inyectado, compuesto por tapones y reducciones, pintados y con zinc con rosca a derecha o izquierda, juntas, soportes, purgador automático, spray de pintura para retoques y demás accesorios necesarios.	1.000	492.05	492.05
	Ud	Kit para conexión de radiador de aluminio inyectado a la tubería de distribución, compuesto por llave de paso termostática, detentor, enlaces y demás accesorios necesarios.	1.000	923.27	923.27
			Subtotal materiales:		3927.46
2		Mano de obra			
	h	Instalador de calefacción.	0.504	73.85	37.22
	h	Ayudante de instalador de calefacción.	0.504	53.23	26.83
			Subtotal mano de obra:		64.05
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	3991.51	79.83
Coste de mantenimiento decenal: L 569,99 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3):		4071.34

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 20. Cotización bomba de calor geotérmica

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	Ud	Bomba de calor reversible, geotérmica, alimentación monofásica a 230 V, potencia calorífica nominal 6,95 kW (COP 4,6), potencia frigorífica nominal 5 kW (EER 3,16), potencia sonora 31,15 dB, dimensiones 1230 x 650 x 695 mm, peso 133 kg, para gas R-410A, con carrocería de lámina de acero galvanizado con aislamiento acústico y panel frontal de plástico ABS, compresor de tipo scroll, válvula de seguridad tarada a 3 bar, purgador automático de aire, soportes anti vibratorios, intercambiadores de placas soldadas de acero inoxidable AISI 316, módulo hidráulico para cada circuito, formado por bomba de circulación de tres velocidades, presostato diferencial de caudal y vaso de expansión, módulo de control por microprocesador, pantalla de control en el panel frontal y sondas de hielo, de temperatura de agua y de temperatura exterior.	1.000	93937.10	93937.10
	Ud	Manguito antivibración, de goma, con rosca de 1", para una presión máxima de trabajo de 10 bar.	4.000	438.37	1753.48
	Ud	Termómetro bimetálico, diámetro de esfera de 100 mm, con toma vertical, con vaina de 1/2", escala de temperatura de 0 a 120 °C.	2.000	751.50	1503.00
	Ud	Válvula de esfera de latón niquelado para roscar de 1".	4.000	259.03	1036.12
			Subtotal materiales:		98229.70
2		Mano de obra			
	h	Instalador de climatización.	7.226	73.85	533.64
	h	Ayudante de instalador de climatización.	7.226	53.23	384.64
			Subtotal mano de obra:		918.28
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	99147.98	1982.96
Coste de mantenimiento decenal: L 64.723,78 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3):		101130.94

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 21. Cotización refrigerante

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	kg	Gas refrigerante R-410A, suministrado en botella con 50 kg de refrigerante.	1.000	547.52	547.52
			Subtotal materiales:		547.52
2		Mano de obra			
	h	Instalador de climatización.	0.110	73.85	8.12
	h	Ayudante de instalador de climatización.	0.110	53.23	5.86
			Subtotal mano de obra:		13.98
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	561.50	11.23
Coste de mantenimiento decenal: L 45,82 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3):		572.73

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Tabla 22. Cotización tubería

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1		Materiales			
	m	Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas de color azul, de 20 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor, SDR11, PN=16 atm.	1.000	18.36	18.36
			Subtotal materiales:		18.36
2		Mano de obra			
	h	Fontanero.	0.024	73.85	1.77
	h	Ayudante de fontanero.	0.024	53.23	1.28
			Subtotal mano de obra:		3.05
3		Herramienta menor			
	%	Herramienta menor	2.000	21.41	0.43
Coste de mantenimiento decenal: L 1,09 en los primeros 10 años.			Costos directos (1+2+3):		21.84

Fuente: (CYPE Ingenieros, s.f.)

Anexo 6. Flujo de fondos

El primer año ocurre el desembolso de la inversión inicial del proyecto. Se calcula el ahorro para el primer año multiplicando el consumo eléctrico del sistema de climatización si necesitara toda la potencia para funcionar, que en este caso serían 5 kW, por la tarifa de la energía eléctrica. Para el resto del año se considera un aumento de la tarifa en un 10%. Al ahorro se le resta el costo de O&M.

Tabla 23. Flujo de fondos

Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Ahorro		L 107,059.20	L 117,765.12	L 129,541.63	L 142,495.80
O&M		-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47
Capital	-L 177,545.01				
Flujo de fondos	-L 177,545.01	L 94,403.73	L 105,109.65	L 116,886.16	L 129,840.33
Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
L 156,745.37	L 172,419.91	L 189,661.90	L 208,628.09	L 229,490.90	L 252,439.99
-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47	-L 12,655.47
L 144,089.91	L 159,764.44	L 177,006.43	L 195,972.62	L 216,835.43	L 239,784.52

Fuente: Elaboración propia