

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Geotermia de baja entalpía como alternativa para calentador de agua  
residencial

Trabajo de graduación presentado por Juan Ignacio Samayoa Farnes  
Marroquín para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecánica

Guatemala,  
2022



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Geotermia de baja entalpía como alternativa para calentador de agua  
residencial

Trabajo de graduación presentado por Juan Ignacio Samayoa Farnes  
Marroquín para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecánica

Guatemala,  
2022



Vo.Bo.:



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

Tribunal Examinador:



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Luis Diego Castañeda Fernández



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. César Alberto Rosales Gómez



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de diciembre de 2022.



---

## Prefacio

---

Este trabajo de graduación va dedicado especialmente a mi padre, Juan Ernesto Samayoa Farnes Ramírez (Q.E.P.D.), quien me apoyó incondicionalmente durante mis primeros cuatro años de carrera, siempre fue mi guía e inspiración y me enseñó a luchar por lo que quiero. Además, también quiero agradecer a mi madre, Adriana Waleska Marroquín de Samayoa y a mi hermano, Rodolfo Ernesto Samayoa Farnes Marroquín, quienes siempre me han apoyado y son mi inspiración.

Por otro lado, también quiero agradecer al departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala, especialmente Ingeniero Víctor Hugo Ayerdi Bardales, mi director de carrera, e Ingeniero Jorge Carlos Escobar Polanco, mi asesor, por todo el apoyo brindado en la realización de este trabajo de graduación y durante toda la carrera.

Por último, quiero agradecer, en general, a la Universidad del Valle de Guatemala y personal, por todo este tiempo de estudio, convivencia y por siempre hacerme sentir parte de esta casa de estudios.



<b>Prefacio</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>6</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Marco teórico</b>	<b>8</b>
5.1.1. ¿Qué es la geotermia de baja entalpía? . . . . .	8
5.1.2. Proyectos relacionados con geotermia de baja entalpía en Guatemala . . . . .	8
5.2.1. Zonas geotérmicas . . . . .	9
5.2.2. Zonas geotérmicas de baja entalpía en Guatemala . . . . .	9
5.2.3. ¿Cómo se analiza un fluido geotérmico? . . . . .	10
5.2.4. Evolución de la temperatura del suelo . . . . .	11
5.3.1. Intercambiador de calor . . . . .	12
5.3.2. Tipos de intercambiadores de calor . . . . .	12
5.3.3. Intercambiador de calor enterrado . . . . .	13
<b>6. Metodología</b>	<b>14</b>
6.1.1. Definir los requisitos del sistema calefactor . . . . .	14
6.1.2. Etapa de diseño del sistema . . . . .	16
6.2.1. Construcción y eficiencia real del prototipo . . . . .	25
6.3.1. Análisis financiero y ahorro energético . . . . .	26

<b>7. Resultados</b>	<b>29</b>
7.1. Resultados del sistema real . . . . .	29
7.1.1. Dimensionamiento del sistema . . . . .	30
7.1.2. Arreglo del intercambiador de calor . . . . .	31
7.2. Resultados del sistema a escala . . . . .	31
7.3. Resultados del análisis financiero . . . . .	32
<b>8. Discusión de resultados</b>	<b>32</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>10. Recomendaciones</b>	<b>36</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>37</b>
<b>12. Apéndice</b>	<b>39</b>

---

## Lista de figuras

---

1. Energías renovables, MEM.	9
2. Energías renovables, MEM.	10
3. Evolución de la temperatura del suelo, IDAE.	11
4. Evolución de la temperatura del suelo en gráfica multivariable, IDAE.	11
5. Curva del efecto embudo, IDAE.	12
6. Configuración del intercambiador de calor enterrado, IDAE.	13
7. Diagrama general del sistema real.	14
8. Curva embudo de datos NABLA.	18
9. Diagrama del sistema real.	18
10. Pérdidas por accesorios.	19
11. Principales propiedades mecánicas del PEAD.	20
12. Principales propiedades térmicas del PEAD.	22
13. Propiedades del agua.	23
14. Bomba centrífuga.	24
15. Diagrama final del sistema real.	25

---

## Lista de cuadros

---

1. Requisitos del sistema calefactor.	15
2. Datos para evaluar la evolución de la temperatura del suelo de Atitlán.	16
3. Evolución de la temperatura del suelo de Atitlán.	17
4. Datos de la temperatura del suelo proporcionados por NABLA.	17
5. Definición de estados del sistema.	21
6. Propiedades del punto dos (2) del sistema.	21
7. Datos para calcular la demanda energética del agua.	22
8. Datos para calcular la longitud del intercambiador de calor.	23
9. Datos para obtener el calor cedido en el prototipo.	26
10. Datos para obtener el calor absorbido por el agua en el prototipo.	26
11. Costos de la implementación del sistema real.	27
12. Consumo energético de la bomba.	27
13. Consumo de calentador eléctrico convencional.	28
14. Estimación de retorno económico del sistema geotérmico.	28
15. Dimensionamiento del sistema real.	29
16. Arreglo del intercambiador de calor.	30
17. Resultados del sistema a escala.	30
18. Resultados del análisis financiero.	31

Debido a la escasez de energía y la falta de agua caliente en algunas regiones de Guatemala, se diseñó un sistema de calefacción capaz de calentar agua residencial hasta una temperatura de 21°C, aprovechando una zona geotérmica ubicada en Atitlán, Sololá. Para diseñar dicho sistema se consiguió, por medio de la constructora guatemalteca NABLA, un conjunto de datos que mostraron una temperatura de 25°C a una profundidad de 6 metros. La longitud necesaria del intercambiador de calor enterrado de polietileno de alta densidad, es de 33.12 metros, con una demanda energética de 16.19kW.

Esto se hizo a través de múltiples análisis termodinámicos y de transferencia de calor. Luego, se procedió a construir un prototipo a escala con los correspondientes componentes y etapas, cuya eficiencia es de 62%. Luego se realizaron varias iteraciones del sistema incorporando las respectivas mejoras para evitar pérdidas en el sistema. Una vez teniendo el prototipo adecuado, se incorporaron algunas pérdidas al sistema real, para así proceder a dimensionar los componentes reales del sistema. El análisis financiero logró un ahorro mensual de Q28.68 por individuo con respecto a un calentador eléctrico convencional, teniendo un retorno de la inversión del sistema geotérmico de baja entalpía en 1 año y 4 meses. Todo esto, satisfaciendo las necesidades de aproximadamente 31 personas, brindando un caudal de 15 litros por minuto y considerando un baño promedio de 7.7 minutos.

Due to the shortage of energy and the lack of hot water in some regions of Guatemala, a heating system capable of heating residential water up to a temperature of 21°C was designed, taking advantage of a geothermal area located in Atitlán, Sololá. To design this system, the Guatemalan construction company NABLA obtained a set of data that showed a temperature of 25°C at a depth of 6 meters. The required length of the high-density polyethylene buried heat exchanger is 33.12 meters, with an energy demand of 16.19kW.

This was done through multiple thermodynamic and heat transfer analyses. Then, a scale prototype was built with the corresponding components and stages, whose efficiency is 62%. Then, several iterations of the system were carried out, incorporating the respective improvements to avoid losses in the system. Once having the adequate prototype, some losses were incorporated into the real system, in order to proceed to size the real components of the system. The financial analysis achieved a monthly saving of Q28.68 per individual with respect to a conventional electric heater, having a return on investment of the low enthalpy geothermal system in 1 year and 4 months. All this, satisfying the needs of approximately 31 people, providing a flow of 15 liters per minute and considering an average bath of 7.7 minutes.

# Capítulo 1

---

## Introducción

---

Según la ONU, un tercio de la población mundial vive sin saneamiento básico y más de 748 millones de personas a nivel mundial, no tienen acceso a agua potable. En Guatemala, según el informe de FuncAGUA 2022, se tienen muchos problemas de abastecimiento de agua dentro de la población. Dicho informe refuerza las conclusiones a las cuales ha llegado la ONU respecto a la problemática de saneamiento y añade la problemática de falta de estructura en Guatemala que permita la distribución de agua a la población. Dentro de este mismo informe se mencionan las principales obligaciones y razones del gobierno para poder abastecer de agua al país entero. El problema es que mucha gente inclusive no tiene acceso a fuentes de agua, ni tampoco a sistemas de distribución de agua como tuberías, cisternas, pozos, entre otros.

Si bien el acceso a agua es un problema sumamente importante a resolver hoy en día, dicha problemática sobrepasa los límites de este proyecto. El enfoque principal es brindar un sistema capaz de ofrecer una solución económica ante la necesidad presente de saneamiento, por medio del suministro de agua caliente para las necesidades básicas de las personas.

Según el informe FuncAGUA 2022, la única manera de suministrar agua caliente a algunas zonas del país, es por medio de extracciones de aguas subterráneas, aunque requieren de un proceso complicado y costoso. Es por esto que en este trabajo lo que se desea lograr es diseñar y fabricar a escala un prototipo de un sistema adecuado que sea capaz de suministrar agua caliente por medio del aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía en Guatemala. Esto con el fin de disminuir los gastos que genera el tener un calentador convencional eléctrico, que calienta agua por medio de calor liberado por resistencias bajo paso de corrientes.

Según un reporte del Ministerio de Energía y Minas, publicado en 2015, la zona de los alrededores del lago de Atitlán resultan ser zonas de yacimientos geotérmicos de posible explotación, donde se pueden aprovechar temperaturas de hasta 186°C y por supuesto, una de las mayores razones de esto es debido a la actividad volcánica de los alrededores, que liberan una gran cantidad de calor bajo tierra.

Por otro lado, al tener la oportunidad de conocer varias personas habitantes del departamento de Sololá que laboran en la planta de Jaguar Energy Guatemala, Masagua, Escuintla; se tuvo la oportunidad de hablar con ellos para realizar encuestas y tomar nota de las necesidades de los habitantes y cómo esto se relaciona a la falta de agua caliente. A partir de las encuestas realizadas se determinó que a pesar que la población de estudio está acostumbrada a utilizar agua sin calentar para suplir sus necesidades de saneamiento, esto se convierte en una situación incómoda en la época

invernal, entiéndase aproximadamente de octubre a enero, donde las temperaturas bajan hasta los 12°C según *weather spark*, ya que resulta un poco tedioso bañarse por las madrugadas con agua a temperatura ambiente. Por lo que se llegó a la conclusión que una temperatura adecuada del agua para asearse pudiese llegar a ser desde los 20°C hasta los 22°C. Por dicha razón este trabajo se enfoca en diseñar un sistema capaz de cubrir una demanda razonable de flujo volumétrico de agua para las tuberías de agua caliente en los hogares y a una temperatura aproximada de 21°C. Cuando se refiere a las tuberías de agua caliente, es porque en las zonas anteriormente mencionadas de Sololá que poseen acceso a agua caliente, se tiene una línea de tubería para agua a temperatura ambiente y otra línea de tuberías para agua caliente.

Luego de obtener información de dichas personas y observar que Atitlán es una zona bastante apta para explotar potencial geotérmico de baja entalpía, se planteó una solución al problema. Dicha solución es diseñar un sistema de calefacción capaz de distribuir agua caliente en zonas de escasos recursos.

En Guatemala, en 2019, se diseñó un sistema de calefacción de piscinas olímpicas por medio de uso de geotermia de baja entalpía. Este trabajo fue realizado por Karen Gatica. El resultado de este estudio fue una demanda energética de 522.98kW, para lograr mantener las piscinas olímpicas entre unas temperaturas de 24°C y 28°C. Traducido a un ahorro energético de 16,785kWh mensuales al ser calentadas por medio de calentadores eléctricos convencionales.

La finalidad de este proyecto es diseñar un sistema real y, fabricar un prototipo de calefactor de agua residencial, aprovechando la energía geotérmica de baja entalpía en Guatemala, capaz de disminuir el consumo energético de los calentadores convencionales

## Capítulo 2

---

### Antecedentes

---

La energía geotérmica se ha utilizado durante siglos con fines térmicos, pero la producción de electricidad a partir del calor de la tierra es mucho más reciente. El primero en hacerlo fue Piero Ginori Conti en Larderello, Italia, en 1904. Un siglo después, la tierra de la Toscana continúa produciendo energía renovable, calor y electricidad. Esta primera vez que se generó energía eléctrica a partir de la geotermia, se hizo a través de los yacimientos de altas temperaturas.

En este ámbito de generación de energía eléctrica, cabe mencionar que entre los años 1974 y 1995, a través de la crisis del petróleo, la generación de energía eléctrica a través de la geotermia, llegó a tener un crecimiento anual mundial de hasta 9%. (Barrero, A., 2003)

Según la Asociación Internacional de Geotermia, hay plantas que producen electricidad a partir del calor de la tierra en 23 países. En Islandia la geotérmica ya genera el 18% de la electricidad; en Filipinas, y según datos del Banco Mundial, hasta el 27%. (Barrero, A., 2003)

La primera vez que se aplicó la energía geotérmica para una aplicación de calefacción fue en 1930, en Islandia. Se creó un sistema de calefacción doméstico a gran escala, que se convirtió en un servicio de acceso público. (Cárcel, F., 2015)

Luego, en Nueva Zelanda, en 1950, se dio la primera aplicación de la geotermia en el ámbito industrial. Fue en una fábrica de pulpa y papel de Kawerau. En Islandia, apenas unos años después, comienzan a emplear el calor generado por la tierra en la industria textil en el lavado de lanas. (Cárcel, F., 2015)

En Indonesia se realizó un estudio para plantear una alternativa de calentamiento a causa de que el volumen de las exportaciones de té de Indonesia a la Unión Europea disminuyó un 43% en 2014 debido a que la Unión Europea estableció un límite máximo de residuos de antraquinona para el té en 0,02 mg / kg. (Gunawan, Y., 2007)

El problema planteado fue que los residuos de Antraquinona se adhieren al té cuando hay combustión incompleta en la combustión de leña para la energía de marchitamiento y secado de las hojas de té. El artículo escrito por Gunawan, propone implementar un nuevo concepto para el uso de energía geotérmica de baja temperatura utilizando un intercambiador de calor de tubos para el marchitamiento del té, para obtener fuentes de energía libres de antraquinona. En las simulaciones creadas en este problema, utilizan agua como fluido, que pasa por un calentador y fluye gracias a una bomba. Las pruebas y los modelos definieron que el intercambiador de calor puede llegar a tener una eficiencia de 66% hasta 79.59%. (Gunawan, Y., 2007)

La disminución en la emisión de gases a causa de la generación de energía, cada día juega un papel más importante dentro de la ingeniería. Sin embargo, en el estudio realizado por Afsaneh, no se evalúa la opción de generar energía eléctrica directamente desde la energía geotérmica. El artículo mencionado con anterioridad, se enfoca en cómo optimizar la eficiencia de un ciclo Rankine, usando la geotermia de baja entalpía. Esta baja entalpía se puede utilizar para incrementar la presión de vapor a la entrada de la turbina, que es lo que este artículo evalúa, aunque también se examina la temperatura del evaporador del ciclo Rankine. Los resultados indican que la eficiencia térmica máxima es de aproximadamente 13,03% que pertenece al ciclo de Rankine orgánico con R123 como fluido de trabajo. El ciclo de  $CO_2$  tiene la máxima eficiencia exergética, igual al 46,13%, por lo que económicamente hablando no es viable. (Afsaneh, N., 2019)

El estudio *Optimal combined heat-and-power plant for a low-temperature geothermal source*, propone utilizar fuentes geotérmicas de baja entalpía para aumentar la eficiencia de una planta de cogeneración. Al aplicar energía geotérmica de baja entalpía en cogeneración, se alcanza una eficiencia de hasta 22,8%, mayor que la de la planta que se acerca a 20%. (Wan Erdeweghe, V., 2018)

En Shenyang, China, se ha estudiado y se ha propuesto la viabilidad de usar geotermia mejorada de temperatura baja combinada con el sistema de bomba de calor para calefacción de invierno. En este caso se tomaron las condiciones y supuestos propios de la localidad de Shenyang. Esta suposición los llevó al análisis financiero que concluye que sería un proyecto de recuperación para 30 años, por lo que no es viable. No es viable, a menos que se asuman condiciones climáticas propias del invierno durante todo el año.

Por otro lado, durante todo el proceso el calor de calefacción cae de 0.53MW a 0.50MW, aunque esto supone que el sistema de geotermia se mantiene constante durante toda su vida útil. Además, realmente a la hora de desarrollar el proyecto, puede haber fallas reales y disminuciones en la eficiencia por esfuerzos y presiones externas en el equipo, por lo que se podría alargar el plazo de recuperación económica. (Yu, Z., 2016)

En Guatemala se propuso la construcción de un sistema de calentamiento de una piscina olímpica, con el fin de sustituir un calentador eléctrico. Se propuso un diseño para un sistema por medio de un intercambiador de calor geotérmico y con una bomba de calor. (Gatica, K., 2019)

Durante todo el trabajo además del diseño del sistema, se compararon los costos con respecto a una piscina calentada por medio de energía eléctrica. También, un punto que es de suma importancia que se presenta en este estudio, es el potencial geotérmico de las zonas en Guatemala.

Luego, también cabe mencionar que en el estudio se hace un análisis de pérdidas de energía, componente por componente. Es decir, cuánta energía se pierde por fricción en las tuberías, las caídas de presión, pérdidas por evaporación de agua, pérdidas por radiación, convección y conducción entre otros. (Gatica, K., 2019)

Por otro lado, se analizaron los costos disponibles en catálogos y aproximaciones de consumo energético de los componentes necesarios y este resultó ser de aproximadamente Q365,000. Un costo bastante alto, donde se considera todo tipo de costo como fabricación, compra, instalación de equipo, entre otros, que pudiera tener el desarrollar este proyecto del sistema de calefacción de la piscina. También cabe mencionar que la demanda energética por calefacción, debido a las pérdidas teóricas del sistema de calefacción, resultó ser de aproximadamente 523W. (Gatica, K., 2019)

Dentro de las conclusiones del estudio propuesto por Gatica, se observó que brinda una metodología para el diseño de un intercambiador de calor enterrado de baja entalpía, que, por

transferencia de calor, permitirá cubrir las necesidades de climatización del agua de una piscina, manteniendo la temperatura en el vaso entre el parámetro óptimo para la práctica de disciplinas deportivas acuáticas, siendo este entre 24 y 28°C. Además, se concluyó que una de las mayores pérdidas es ocasionada por el gradiente de temperatura entre el agua del vaso y el agua de renovación. Por esta razón, dicha carga se calculó para la temperatura mínima promedio en el área de estudio, equivalente a 6.1 °C. (Gatica, K., 2019)

Por último, en cuanto a las especificaciones necesarias para el sistema, para climatizar una piscina con las características establecidas, es necesario implementar un sistema de calefacción con una bomba de calor de 140,000 BTU/h, esto equivale a un consumo de 41,03 kW de energía. El sistema propuesto, solamente utilizará energía eléctrica para accionar la bomba de circulación de agua, siendo la energía consumida equivalente a 3,73 kW. (Gatica, K., 2019)

## Capítulo 3

---

### Justificación

---

En Guatemala, existe gran cantidad de yacimientos geotérmicos que no se utilizan para ninguna aplicación. Por ejemplo, algunos ubicados en Atilán, Palencia, Motagua, entre otros. (MEM, 2018) Sin embargo, hay una gran brecha en cuanto a los recursos energéticos para varias comunidades. Una de las consecuencias de esto, es que múltiples hogares no cuentan con acceso a una fuente de calefacción para agua de uso cotidiano. Cabe añadir que, debido a los recursos económicos de dichas comunidades, se vuelve prácticamente nula la posibilidad de adquirir e instalar un calefactor de agua eléctrico, ya que el consumo de un calentador eléctrico puede ser de hasta 5.9kW-h, por cada hora de uso.

Con respecto a las personas afectadas con esta problemática, el número de familias sin servicio de energía pasó de 272 mil 126 a 287 mil 437 en 2016 según el informe divulgado por el Ministerio de Energía y Minas, según datos elaborados por esa entidad con base en el Censo efectuado en el 2018 en el país. Esto se puede tomar como un indicador de la cantidad de hogares que no cuentan con acceso a un calentador de agua eléctrico. Cabe añadir, que un calentador de gas en Guatemala tiene un costo alrededor de Q3,600. Es por esto por lo que es una solución viable implementara calefactores de agua que aprovechen la energía geotérmica.

Por lo tanto, una solución a la problemática descrita anteriormente, sería diseñar y fabricar un prototipo de calefactor de agua residencial, aprovechando la energía geotérmica de baja entalpía en Guatemala, capaz de disminuir el consumo energético de los calentadores convencionales. Con este proyecto se desea poder realizar un prototipo este sistema de calefacción para implementar el sistema real en varias ubicaciones de Guatemala donde hay yacimientos de energía geotérmica. Además de un análisis financiero para poder estudiar la viabilidad acorde a los recursos económicos de las comunidades. Esto se puede relacionar con el cumplimiento del ODS 7, ya que se implementa el uso de energía renovable.

#### 4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema real y fabricar un prototipo de calefactor de agua residencial aprovechando la energía geotérmica de baja entalpía en Guatemala, capaz de disminuir el consumo energético de los calentadores convencionales.

#### 4.2 Objetivos específicos

- 1) Identificar las etapas necesarias del sistema de calentamiento con sus propiedades termodinámicas específicas.
- 2) Determinar el caudal necesario para el sistema de calentamiento de agua.
- 3) Determinar la tasa de energía que se necesita extraer del pozo geotérmico.
- 4) Diseñar y construir los elementos necesarios para evaluar el funcionamiento real del prototipo del sistema.
- 5) Elaborar un análisis financiero para determinar la posibilidad de implementar un sistema real.

#### 5.1.1. ¿Qué es la geotermia de baja entalpía?

Suele llamarse energía geotérmica de baja entalpía a aquel tipo que suele ser insuficiente para generar energía eléctrica. Estos recursos de energía de baja entalpía suelen encontrarse alrededor de los 50°C. Estos tipos de recursos han encontrado varias aplicaciones en métodos de calefacción desde el año 1930, en Islandia. Lo que se hizo fue crear un sistema de calefacción doméstico a gran escala, que se convirtió en un servicio a futuro para una parte de la sociedad de Islandia. (Cárcel, 2015)

#### 5.1.2. Proyectos relacionados con geotermia de baja entalpía

En Guatemala se propuso diseñar un sistema de calentamiento de una piscina olímpica, con el fin de sustituir un calentador eléctrico. Se propuso un diseño para un sistema por medio de un intercambiador de calor geotérmico y con una bomba de calor. La principal conclusión fue que el sistema de calefacción de agua con base en energía geotérmica de baja entalpía es capaz de reducir el 90,9 % del consumo energético en una piscina (Gatica, K., 2019)

Durante todo el trabajo además del diseño del sistema, se fueron comparando los costos con respecto a una piscina calentada por medio de energía eléctrica. También, un punto que es de suma importancia que se presenta en este estudio, es el potencial geotérmico de las zonas en Guatemala. Luego, también cabe mencionar que en el estudio se hace un análisis de pérdidas de energía, componente por componente. Es decir, cuánta energía se pierde por fricción en las tuberías, las caídas de presión, pérdidas por evaporación de agua de la piscina, pérdidas por radiación debido al ambiente, convección y conducción entre otros. (Gatica, K., 2019)

En Shenyang, China, se ha estudiado y se ha propuesto la viabilidad de usar geotermia mejorada de temperatura baja combinada con el sistema de bomba de calor para temporada de invierno. (Yu, Z., 2016)

### 5.2.1. Zona geotérmica

El MEM, define una zona geotérmica como la porción de calor desprendido desde el interior de la tierra que puede ser aprovechado por el hombre con las técnicas actuales. A diferencia de un yacimiento geotérmico, que es un recurso que tiene las condiciones favorables (geológicas y geotérmicas) para que se pueda explotar de forma económica.

Existen otras áreas en algunas partes del país con manifestaciones geotérmicas que solamente se han mencionado y no poseen ninguna clase de estudios, en ellas las manifestaciones supondrían la existencia de algún yacimiento geotérmico. Estas áreas se han identificado por existir algunos balnearios con aguas termales o haber encontrado estas aguas en alguna perforación de pozos mecánicos en busca de agua potable o riego, de esta manera forman parte de un inventario de manifestaciones geotérmicas que posee el país. (MEM, 2015)

Actualmente en Guatemala, existen dos plantas geotérmicas de producción continua de energía eléctrica. La primera es la planta Zunil 1, ubicada en Quetzaltenango con una capacidad de 24.0MW y la segunda es la planta Ortitlán, ubicada en Amatitlán con una capacidad de 25.2MW. (MEM, 2018)

Por último, cabe añadir que según el ministerio de energía y minas (MEM), se espera desarrollar 3 proyectos geotérmicos en un futuro. El Ceibillo de 252.0MW en Amatitlán, Cerro Blanco de 50.0MW en Jutiapa y, El Porvenir de 20.0MW en Estanzuela, Zacapa.

### 5.2.2. Posibles zonas geotérmicas viables de baja entalpía en Guatemala

En busca de una temperatura promedio de la zona geotérmica no tan alta, habiendo capacidad de hacer una extracción para el pozo y encontrar la temperatura deseada, se tienen las siguientes dos zonas. Estas zonas, según el MEM, son las de menor temperatura, por lo que aplican para poder ser explotadas en baja entalpía.

La primera, es en Atitlán, en donde se pueden encontrar hasta los 186°C.

**Figura 1. Energías renovables.**

**ATITLÁN:**

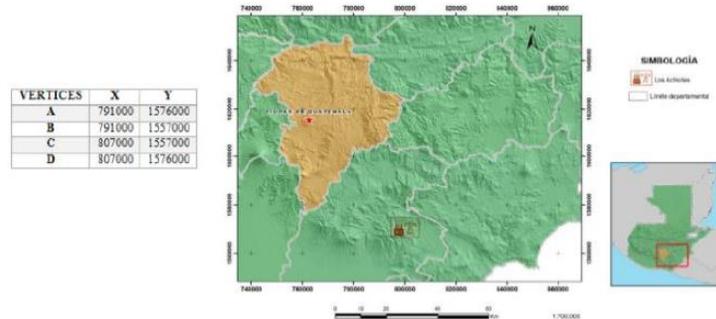
En los alrededores del lago de Atitlán, temperatura: 186°C.



Fuente: (MEM, 2015)

La segunda, con la misma temperatura es en Los Achiotos, donde hay una zona geotérmica en Tecuamburro.

**Figura 2. Energías renovables.**



Fuente: (MEM 2015)

### 5.2.3. Análisis de un fluido geotérmico

Según un artículo titulado “*Critical insights into thermohaline stratification for geothermal energy recovery from flooded mines with mine water*” publicado por Ting Bao, Han Cao, Yinghong Qin, Guosheng Yiang y Leo Liu en 2014, resulta conveniente estudiar una muestra de ese fluido por medio de un laboratorio químico. Sin embargo, el enfoque principal de la investigación se centra en la comprensión científica del sistema de formación geológico-agua de la mina natural, especialmente el transporte de calor y masa en este sistema natural a gran escala, que es fundamental para la eficiencia y sostenibilidad de la renovación energética. Lo que se hace en este estudio es tomar muestras de agua y enviarlas a un laboratorio para investigar sus propiedades químicas y analizar en qué campo se podría sacar provecho de las propiedades que tiene esta agua. Finalmente, se llevan a cabo simulaciones, basadas en la información geológica real, para investigar preliminarmente el movimiento del agua en *cuasi-equilibrio* en este pozo de la mina local debido a los gradientes geotérmicos para proporcionar información sobre los fenómenos observados en el estudio de campo.

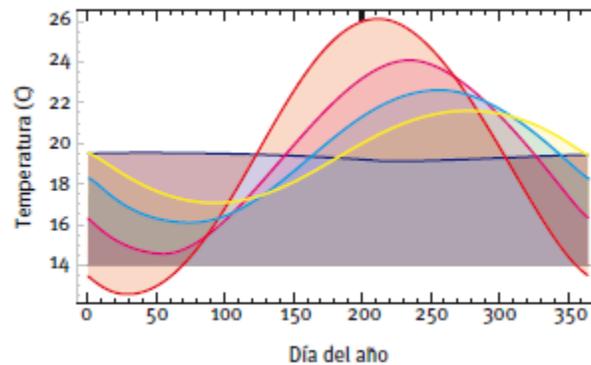
Otro estudio, titulado “*El gobierno del Reino Unido reconoce las preocupaciones sobre la disponibilidad a largo plazo de los combustibles fósiles tradicionales y se están investigando activamente los suministros sostenibles y bajos en carbono*”, analiza el uso de calor de baja entalpía, utilizando tecnología de fuente terrestre para recuperar el calor de las minas de carbón inundadas abandonadas. Se dice que las reacciones exotérmicas del carbón activado que resta en las minas, es una gran ayuda para poder elevar la temperatura del agua de las minas abandonadas. Esta agua se usa para ayudar a disminuir el uso de fuentes fósiles de energía para obtener agua caliente.

Una de las principales conclusiones de este artículo es que, al usar geotermia de baja entalpía para calentar espacio (bombas de calor) y para calentar agua, disminuye desde 59% hasta 76% las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto cumple el ODS de energía renovable. (Farr, 2016) Claramente este estudio hace alusión a que una opción para encontrar una zona geotérmica de baja entalpía, sería buscar alrededores de un volcán, que aún tengan carbón activado, sabiendo que Guatemala posee demasiada actividad volcánica.

### 5.2.4. Evolución de la temperatura del suelo

Según IDAE, Gobierno de España, en una guía técnica para diseño de intercambio de calor geotérmico, se establece que luego de aproximadamente los 10 metros de profundidad, el suelo logra alcanzar una temperatura constante y que, entre los 0 y 10 metros, la temperatura varía según las propiedades del suelo y los días del año. Estas propiedades son la conductividad, difusividad, calor específico, etc.

**Figura 3. Evolución de la temperatura del suelo.**

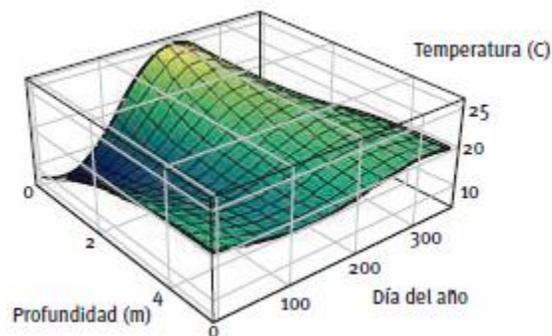


Fuente: (IDAE, 2012)

En esta imagen se muestra diferentes puntos a diferentes temperaturas, así como su evolución de temperatura en varios días del año. Se ve que la amplitud decrece variando las profundidades, así como sus máximos y mínimos. Esto nuevamente muestra que, a mayor profundidad, la temperatura va llegando a ser estacionaria. El azul oscuro representa una profundidad de 10 metros.

En la Figura 4, se puede observar una gráfica multivariable donde se ve una mejor idea para poder apreciar cómo a mayor profundidad, varía menos la temperatura conforme pasan los días del año.

**Figura 4. Evolución de la temperatura del suelo en gráfica multivariable.**



Fuente: (IDAE, 2012)

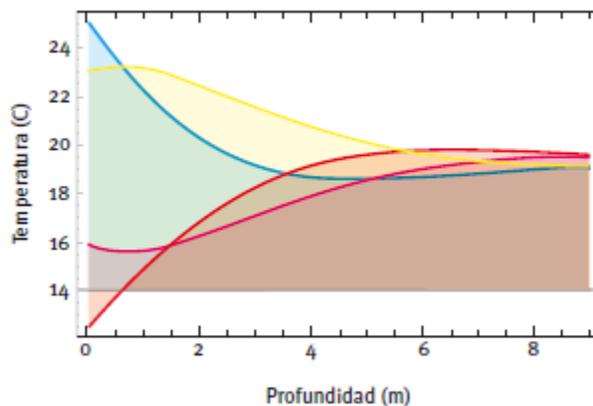
Por otro lado, surge la duda de cómo calcular dicha temperatura a cierta profundidad del suelo y día del año. Para esto, se tiene la ecuación de Kusuda (García & Rey, 2014).

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{365} \left( t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $T$  es la temperatura del suelo en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $z$  es la profundidad en metros,  $T_m$  es la temperatura media anual del suelo en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $A_s$  es la oscilación de la temperatura anual del suelo,  $t$  es el tiempo en días,  $t_o$  es el desfase en días, donde según el análisis de Kusuda un valor típico es de 35 y  $\alpha$  es la difusividad térmica del suelo en  $\text{m}^2/\text{día}$ . Siendo para un suelo húmedo como Amatitlán, 0.09.

Por otro lado, cabe mencionar un fenómeno llamado efecto embudo. Este efecto básicamente consiste en que, sin importar la temperatura ambiente, conforme la profundidad va aumentando en el pozo geotérmico, se llega hacia una misma temperatura. A continuación, en la Figura 5, se observa dicho fenómeno.

**Figura 5. Curva de efecto embudo.**



Fuente: (IDAE, 2012)

Es importante mencionar que la temperatura tiene un comportamiento constante a profundidades localizadas entre los 10 y los 70 m bajo tierra (IDAE, 2012). Luego, la temperatura puede ir variando de manera general entre los 15 y 30 grados centígrados, por cada kilómetro de profundidad.

### 5.3.1. Intercambiador de calor

Es un dispositivo diseñado para transferir calor ya sea por convección o por conducción. Son elementos fundamentales en los sistemas de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía, procesamiento químico, además de en aparatos de la vida cotidiana.

### 5.3.2. Tipos de intercambiadores de calor

Hay una gran variedad de intercambiadores de calor y muchas fuentes los clasifican de distinta manera. No obstante, entre los más usados y más conocidos están los siguientes:

- Intercambiador de calor de tierra o enterrado.
- Intercambiador de calor de placas.
- Intercambiador de calor de tubos.
- Intercambiador de calor de flujo cruzado.
- Intercambiador de calor de flujo paralelo.

### 5.3.3. Intercambiador de calor enterrado

Este intercambiador de calor consiste en enterrar una red de tubería a una cierta profundidad, donde haya la temperatura suficiente para poder absorber el calor y calentar el fluido que está pasando por dicha tubería. En este caso, agua.

El dimensionamiento de este intercambiador de calor enterrado se elabora por medio de un análisis de balance de energía y transferencia de calor.

Por último, entre las configuraciones posibles para un arreglo de un intercambiador de calor enterrado, se encuentran flujo en serie horizontal y flujo en serie vertical. Aunque para este trabajo se opta por un arreglo en serie horizontal tipo simple, este arreglo se muestra en la Figura 6.

**Figura 6. Configuración del intercambiador de calor.**

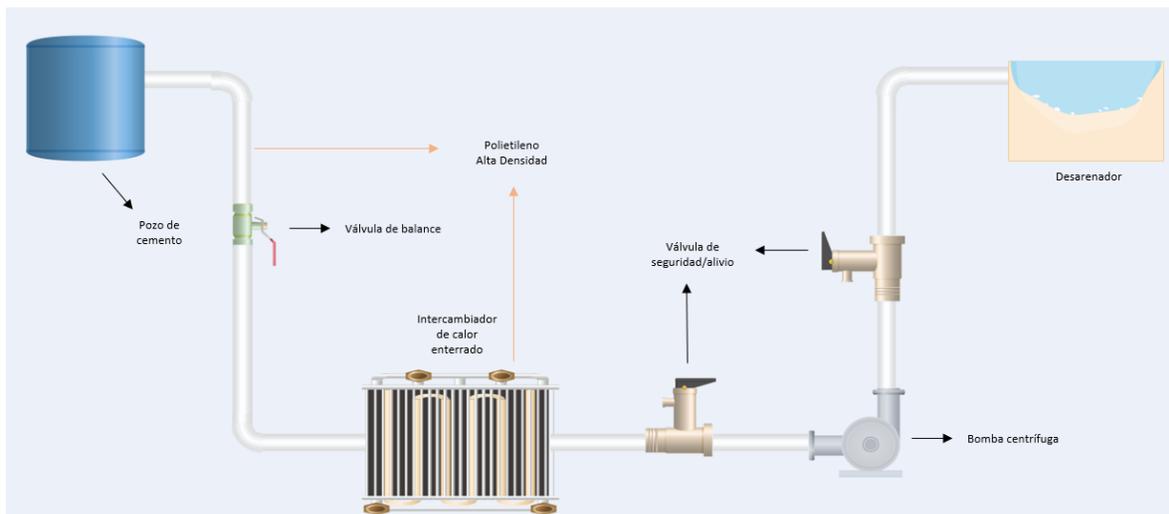


Fuente: (IDAE, 2012)

#### 6.1.1. Definir los requisitos del sistema calefactor

Como primer paso de la metodología, se procedió a hacer un esquema general del sistema real. Esto para poder definir los requisitos del sistema real, en el esquema se identifican los materiales de los componentes. El esquema del sistema real se muestra en la Figura 7.

**Figura 7. Diagrama general del sistema real.**



Fuente: (Elaboración propia)

Respecto al sistema es importante mencionar lo siguiente.

- El cemento es un buen aislante, por lo que se optó por ese material.
- El polietileno es muy flexible y resistivo a la corrosión, por lo que resulta un material muy conveniente para la tubería, esta será  $PE_{100} PN_{10}$  de 1" de diámetro nominal.
- Luego, la bomba es elemental para su función de hacer fluir al fluido circulante.
- Por último, mencionar que la válvula de balance regula el caudal a entrar al sistema y las válvulas de seguridad evitan algún dispare de presión debido a las presiones altas manejadas en el sistema.

Luego de ya tener el esquema general del sistema real, se procedió a definir los requisitos del mismo. Estos se muestran a continuación, en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Requisitos del sistema calefactor.**

Tipo de requisito	Código	Descripción
General	G – 01	La temperatura de salida de agua del sistema debe ser de 21°C.
General	G – 02	El sistema de calefacción debe circular únicamente con una bomba centrífuga.
Materiales	M – 01	Toda la tubería del sistema debe ser de polietileno de alta densidad.
Materiales	M – 02	El pozo de agua debe ser de cemento, material aislante.
Dimensionamiento	D – 01	La profundidad del intercambiador de calor no debe ser mayor a 7 metros.
Dimensionamiento	D – 02	La potencia de la bomba circulante no debe exceder medio caballo de fuerza.
Dimensionamiento	D – 03	La longitud del intercambiador de calor no debe ser mayor a 40 metros.
Objetivo	O – 01	El sistema de calefacción debe ser capaz de mantener un caudal de salida constante.
Objetivo	O – 02	El sistema de calefacción debe ser capaz de mantener una temperatura de salida constante.
Diseño	DI – 01	El diseño del sistema debe ser adecuado, para poderse replicar en tamaño real.
Seguridad	S – 01	Debido a las presiones a manejar, el sistema debe poder detenerse por completo para su correcto mantenimiento.

Fuente: (Elaboración propia)

### 6.1.2. Etapa de diseño del sistema real

Como primer punto fue indispensable definir una ubicación adecuada para el pozo geotérmico antes de realizar cualquier cálculo. Para esto se obtuvo información del marco teórico sobre las zonas geotérmicas posibles de Guatemala y se decidió por Atitlán, debido al acceso a la información mencionada en la introducción y a los datos que se mencionarán en el Cuadro 4.

Luego, acorde a las propiedades de la zona de Atitlán, se procedió a analizar el comportamiento del suelo, la ecuación y los datos se muestran a continuación.

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{365} \left( t - t_o - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

Los datos a considerar se aprecian en el siguiente Cuadro 2.

**Cuadro 2. Datos para evaluar la evolución de la temperatura del suelo de Atitlán.**

Dato	Valor	Unidad
$T_m$	25	°C
$A_s$	10	°C
$t$	0	Días
$t_o$	35	Días
$\alpha$	0.09	$m^2/\text{día}$

Fuente: (Elaboración propia)

Los resultados de la corrida se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Evolución de la temperatura del suelo de Atilán.**

Profundidad (m)	Temperatura (°C)
1.5	15.35
3	15.70
4.5	15.95
6	16.21
7.5	16.45
9	16.65
10.5	16.83

Fuente: (Elaboración propia)

Ahora bien, cabe mencionar que a través de la constructora guatemalteca *NABLA*, se obtuvo una corrida de datos hecha a través de la construcción de un sótano. Esta constructora obtuvo los datos por necesidad de estudio de esfuerzos en el concreto de las paredes del sótano. Estos datos se muestran a continuación en el Cuadro 4.

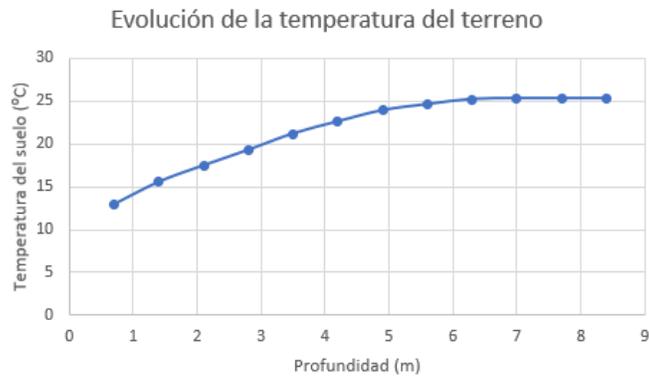
**Cuadro 4. Datos de la temperatura del suelo proporcionados por NABLA.**

Profundidad (m)	Temperatura (°C)
0.7	13
1.4	15.6
2.1	17.5
2.8	19.3
3.5	21.2
4.2	22.6
4.9	23.9
5.6	24.6
6.3	25.2
7	25.3
7.7	25.3
8.4	25.3

Fuente: (Elaboración propia)

Luego de analizar estos datos, se extrajo una gráfica para ver su comportamiento. Los datos resultaron ser coherentes debido a que obedecen la curva embudo, fenómeno que siempre se debe poder apreciar a profundidades bajas. La gráfica se muestra en la Figura 8.

**Figura 8. Curva embudo de datos NABLA.**

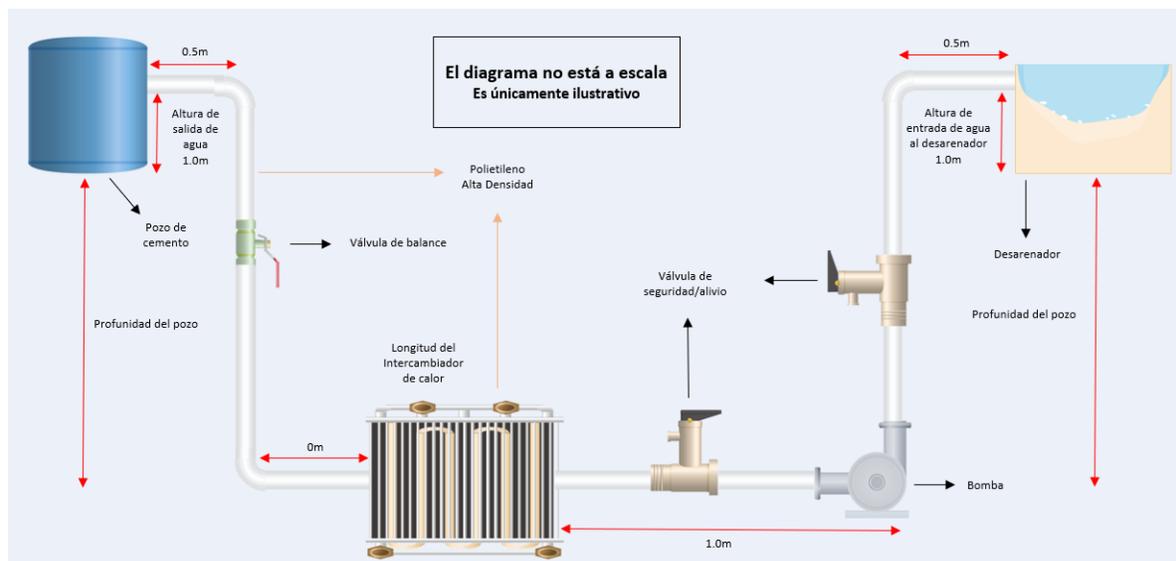


Fuente: (Elaboración propia)

Después, se procedió a tomar en cuenta que, con un pozo geotérmico no mayor a 6 metros, se puede conseguir una temperatura de 25°C. Por lo que los cálculos basan de este dato.

Para comenzar los cálculos, se tomaron en cuenta ciertas medidas iniciales del sistema, las cuales se muestran en la Figura 9.

**Figura 9. Diagrama del sistema real.**



Fuente: (Elaboración propia)

Es importante mencionar que se consideró el punto (1) como la salida del pozo de cemento, el punto (2) como la entrada al intercambiador de calor, el punto (3) como la salida del intercambiador de calor y finalmente, el punto (4) como la salida hacia el desarenador.

Los supuestos a considerar para los cálculos, fueron los siguientes:

- El agua en el pozo se encuentra a 13°C (Weather Spark) y 1atm.
- El agua sale del sistema a 21°C y 1atm.
- La velocidad necesaria mínima en el sistema para sus pruebas es de 0.6m/s. (IDAE, 2012)
- Entre los puntos de 1 a 2 y de 3 a 4, la temperatura se mantiene constante.
- Una persona en promedio se baña en 7.7 minutos. (Gauley, 2017)

Una vez tomando en cuenta estos supuestos, se procedió a realizar de primero un balance de energía por medio de la ecuación 2, entre el punto (1) y (2). Tomando en cuenta pérdidas por accesorios y por fricción, ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

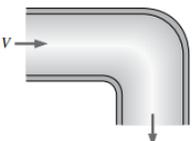
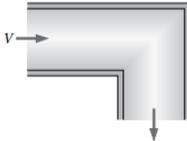
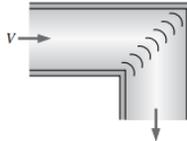
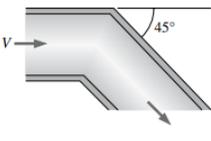
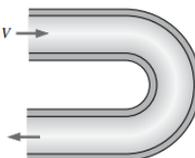
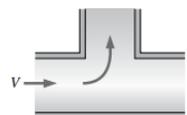
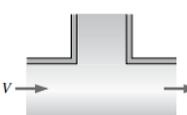
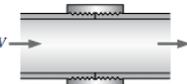
$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - h_L - h_f + h_B = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde P son las respectivas presiones, v las velocidades, z las alturas,  $h_B$  la altura de la bomba,  $h_L$  las pérdidas por accesorios y  $h_f$  las pérdidas por fricción.

$$h_L = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde k son los coeficientes de pérdidas. Estos coeficientes de pérdidas se muestran en la Figura 10.

**Figura 10. Pérdidas por accesorios.**

<p><b>Codos y ramificaciones</b> Codo suave de 90°: Embridado: <math>K_L = 0.3</math> Roscado: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>Codo esquinado de 90° (sin álabes directores): <math>K_L = 1.1</math></p> 	<p>Codo esquinado de 90° (con álabes directores): <math>K_L = 0.2</math></p> 	<p>Codo roscado de 45°: <math>K_L = 0.4</math></p> 
<p>Codo de retorno de 180°: Embridado: <math>K_L = 0.2</math> Roscado: <math>K_L = 1.5</math></p> 	<p>Conexión en T (flujo deriv.): Embridado: <math>K_L = 1.0</math> Roscado: <math>K_L = 2.0</math></p> 	<p>Conexión en T (flujo en línea): Embridado: <math>K_L = 0.2</math> Roscado: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p>Unión roscada: <math>K_L = 0.08</math></p> 

Fuente: (Cengel, 2018)

En este caso cabe mencionar que se usarán los coeficientes “*embridados*”, ya que por ser tubería flexible los accesorios únicamente desvían el fluido, no interrumpen el flujo, como en el caso de algo roscado.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 4})$$

En esta ecuación  $f$  es el coeficiente de fricción del material de la tubería,  $L$  la longitud de la tubería y  $D$  el diámetro nominal de la tubería. El valor del coeficiente de fricción del polietileno de alta densidad se muestra en la Figura 11.

**Figura 11. Principales propiedades mecánicas del PEAD.**

Propiedades	Unidades	Valor
Coefficiente de Fricción		0,29
Dureza – Rockwell		D60-73 – Shore
Módulo de Tracción	( GPa )	0,5-1,2
Relación de Poisson		0,46
Resistencia a la Tracción	( MPa )	15-40
Resistencia al Impacto Izod	( J m <sup>-1</sup> )	20-210

Fuente: (Calderón, 2005)

Una vez teniendo las ecuaciones y coeficientes necesarios, se procedió a insertar datos a las ecuaciones y obtener resultados, estos se muestran en el Cuadro 5. También se muestran los valores establecidos para los puntos 3 y 4, ya que el análisis fue el mismo.

**Cuadro 5. Definición de estados del sistema.**

Punto	Dato	Valor	Unidad
1	Presión	1.00	atm
2	Presión	157.6	kPa
1	Velocidad	0.60	m/s
2	Velocidad	0.60	m/s
1	Altura	7.00	m
2	Altura	0.00	m
1-2	Pérdidas por accesorios	0.011	m
1-2	Pérdidas por fricción	1.25	m
3	Presión	103.6	kPa
4	Presión	1.00	Atm
3	Velocidad	0.60	m/s
4	Velocidad	1.24	m/s
3	Altura	0	m
4	Altura	7	m
2-3	Pérdidas por accesorios	0.011009	m
2-3	Pérdidas por fricción	5.5076	m

Fuente: (Elaboración propia)

Ahora bien, para el caso del dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado, se procedió a calcular la tasa de calor necesario para llevar el agua residencial de 13°C a 21°C. Para este caso lo primero a realizar fue ingresar las propiedades del punto 2 en MiniREFPROP y así obtener datos necesarios para algunos cálculos. Estas propiedades se muestran en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Propiedades del punto dos (2) del sistema**

Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Densidad ( $kg/m^3$ )	Cp (kJ/kg-K)
13.00	157.6	999.4	4.191

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez teniendo estos datos disponibles, considerando la velocidad requerida de 0.6m/s y el diámetro nominal de la tubería, se procedió a calcular la demanda energética requerida por el agua para llevarla hasta 21°C por medio de la ecuación 5.

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 5})$$

Los datos y el resultado de la demanda energética se muestran en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Datos para calcular la demanda energética del agua**

Dato	Valor	Unidades
$T_i$	13.00	°C
$T_f$	21.00	°C
$Q$	0.00048	$m^3/s$
$\dot{m}$	0.4830	kg/s
$\dot{q}$	16.19	kW

Fuente: (Elaboración propia)

Luego, conociendo ya el valor de la demanda energética necesaria para el agua, se procedió a calcular la longitud necesaria de la tubería del intercambiador de calor, por medio de la ecuación 6, ecuación de Fourier.

$$\dot{q} = \frac{2\pi \cdot k \cdot L \cdot (t_i - t_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (\text{Ec. 6})$$

Ahora bien, se necesita el coeficiente de conductividad  $k$  para el polietileno de alta densidad, este valor se muestra en la Figura 12.

**Figura 12. Principales propiedades térmicas del PEAD.**

Propiedades	Unidades	Valor
Calor Específico	( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.9
Conductividad Térmica	a 23 °C ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.45-0.52
Dilatación Térmica	( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	100-200
Temperatura Máxima de Utilización	( °C )	55-120
Temperatura de Deflexión en Caliente – 0.45Mpa	(°C )	75

Fuente: (Calderón, 2005)

Una vez teniendo todos los datos, se procedió a calcular la longitud del intercambiador de calor, los datos y el resultado se muestran en el Cuadro 8. Se utilizó  $k$  como 0.45 como medida conservadora.

**Cuadro 8. Datos para calcular la longitud del intercambiador de calor.**

Dato	Valor	Unidades
$T_i$	13.00	°C
$T_o$	25.00	°C
$D_o$	34.3	mm
$D_i$	32	mm
$\dot{q}$	16.19	kW
L	33.12	m

Fuente: (Elaboración propia)

Con todos los datos anteriormente mencionados, se calculó el número de Reynolds y fue de 15,930. Al ser mayor a 4,000, es un flujo turbulento, lo que da un mejor intercambio de calor. Esto se debe a que las moléculas se mueven de forma más desordenada y a mayor velocidad, por lo que la transferencia de calor entre moléculas es mejor. La ecuación 7 muestra la expresión para obtener el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde rho es la densidad del fluido y mu es la viscosidad dinámica del fluido. La densidad fue obtenida a través del software MiniREFPROP, mientras que, para la viscosidad dinámica, fue necesario interpolar datos de la Figura 13.

**Figura 13. Propiedades del agua.**

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Presión de saturación $P_{sat}, \text{kPa}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$		Entalpia de vaporización $h_{ig}, \text{kJ/kg}$	Calor específico $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$		Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$		Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	$1.792 \times 10^{-3}$	$0.922 \times 10^{-5}$
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	$1.519 \times 10^{-3}$	$0.934 \times 10^{-5}$
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	$1.307 \times 10^{-3}$	$0.946 \times 10^{-5}$
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	$1.138 \times 10^{-3}$	$0.959 \times 10^{-5}$
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	$1.002 \times 10^{-3}$	$0.973 \times 10^{-5}$

Fuente: (Cengel, 2018)

Después de haber realizado los análisis de energía y de transferencia de calor, es pertinente elegir una bomba que circule toda el agua dentro del sistema. La bomba elegida fue una bomba centrífuga para agua modelo europeo marca Truper, con una potencia de ¼HP. Las especificaciones se muestran en la Figura 14.

**Figura 14. Bomba centrífuga marca Truper**



Fuente: (Truper, 2022)

Algunas cuestiones a considerar de la bomba, para asegurar su pertinencia, son las siguientes.

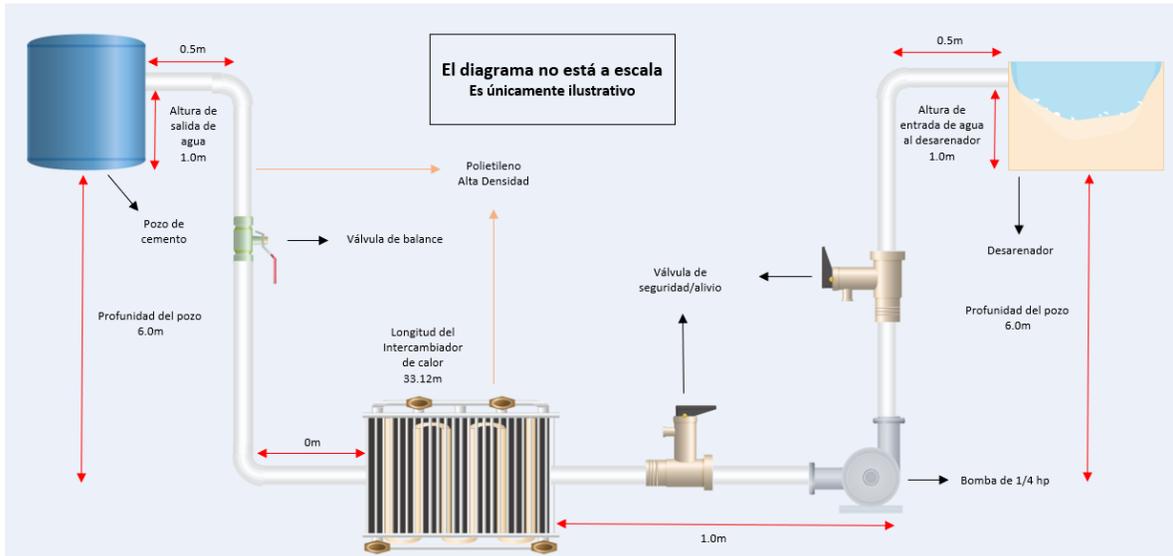
- Posee una profundidad de succión de 8 metros, por lo que resulta adecuada para los 6 metros de profundidad del pozo geotérmico.
- Posee un flujo máximo de 70 litros por minuto, lo cual es viable para los 29 litros por minuto a la succión y capaz de entregar 60 litros por minuto en la salida. Esto con el fin de no forzar la bomba a trabajar a máxima capacidad.
- Posee un diámetro de entrada y salida de 1". Adecuado para el tamaño de la tubería.
- Posee una tensión de 127 voltios y una corriente de 3.5 amperios por lo que su consumo es de 0.4445 kW-h por cada hora de operación.
- Es una bomba de potencia baja, aunque mayor a la necesaria, que es de aproximadamente 35W. Esto con el fin de aprovechar su alto caudal de salida y almacenar agua caliente en un tanque aislado térmicamente, para así tener agua caliente a disposición al momento de su uso.

Cabe mencionar que, para obtener la potencia de la bomba, se realizó un balance de energía por medio de la ecuación 2. Una vez teniendo la altura de la bomba, se procedió a calcular la potencia por medio de la ecuación 8.

$$P_{Bomba} = h_{Bomba} \cdot \rho \cdot g \cdot Q \quad (\text{Ec. 8.})$$

Por último, a continuación, en la Figura 15, se muestra un diagrama final del sistema real de calefacción por medio de energía geotérmica de baja entalpía.

**Figura 15. Diagrama final del sistema.**



Fuente: (Elaboración propia)

### 6.2.1. Construcción y eficiencia real del prototipo

La propuesta de los materiales para la construcción del prototipo se muestra a continuación.

- Un recipiente con agua a temperatura ambiente (22°C) que funciona como el tanque de agua.
- Mangueras de polietileno de 1/4'' para la tubería del prototipo.
- Válvula de balance de 1/4''.
- Un recipiente aislado con agua calentada por medio de una resistencia eléctrica de 0.75kW que funciona como el pozo geotérmico. En este caso se utilizó una hielera de poliestireno expandido para evitar así, pérdidas de calor por conducción del material. (Apéndice, imagen 3).
- Una bomba para fuentes con una cabeza de 1.30 metros y flujo máximo de 5 litros por minuto. (Apéndice, Imagen 2)
- Un recipiente para recibir el agua de salida y medir la temperatura.
- Un termómetro digital flexible con 3 cifras significativas.

El sistema ensamblado se puede apreciar de manera detallada en el apéndice, Imagen 1. Se puede apreciar que en el arreglo del intercambiador se insertaron unos pequeños palillos. Estos palillos tomaron la función de las zanjas que se observan en la Figura 6. Además, cabe mencionar que para el prototipo no fue necesario utilizar válvulas de alivio debido a que no se manejan presiones tan altas como en un sistema real.

Es importante mencionar que, debido al pequeño tamaño del prototipo, se omitieron las pérdidas por accesorios y por fricción dentro de la tubería. Esto se debe a que las mangueras de polietileno poseen mucho menor coeficiente de fricción que el polietileno de alta densidad. Además, también las velocidades dentro del prototipo eran muy bajas. La finalidad del prototipo únicamente fue analizar los intercambios de calor y su eficiencia real.

A continuación, se detalla de qué forma se midió la eficiencia del prototipo.

Primero, por medio de la ecuación 6, se puede calcular la tasa de calor que se le está entregando al agua que pasa por medio de la tubería. Estos datos se muestran en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Datos para obtener el calor cedido por el prototipo.**

Dato	Valor	Unidades
$D_o$	0.32	pulgadas
$D_i$	0.25	pulgadas
$T_o$	38.0	°C
$T_i$	22.0	°C
$L$	3.00	m
$k$	0.5	W/m-K
$\dot{q}$	611	W

Fuente: (Elaboración propia)

Luego, por medio de la ecuación 5, se puede calcular qué tanto calor está aprovechando el agua, midiendo la temperatura a la cual estaba saliendo. Estos datos se muestran en el Cuadro 10.

**Cuadro 10. Datos para obtener el calor absorbido por el agua en el prototipo**

Dato	Valor	Unidades
$T_i$	22.0	°C
$T_f$	23.8	°C
$\dot{m}$	0.05	Kg/s
$c_p$	4.19	kJ/kg-K
$\dot{q}$	377.1	W

Fuente: (Elaboración propia)

En lo que se está interesado dentro del prototipo es en determinar qué tan bien se transfiere el calor del recipiente con agua caliente que toma la función del pozo geotérmico, hacia el agua que fluye por las tuberías de polietileno. Por lo que por medio de la ecuación 9, se puede calcular la eficiencia.

$$eficiencia = \frac{beneficio}{inversión} \quad (Ec. 9)$$

Definiendo en este caso lo que se obtiene como la energía en forma de calor que ganó el agua y lo que se invierte como la energía en forma de calor que se le transmite al agua mientras pasa por la tubería. Esta energía proviene de trabajo eléctrico, ya que la temperatura del agua que simuló el pozo geotérmico, se elevó por medio de una resistencia eléctrica. Le eficiencia fue de 62%.

### 6.3.1. Análisis financiero del sistema real

La cotización de la implementación de un sistema real, se muestra a continuación.

**Cuadro 11. Costos de la implementación del sistema real**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto
Retroexcavadora (15m <sup>3</sup> /h)	Hora	14.4	Q 780.00	Q 11,232.00
Tubos de PEAD 1"	m	38	Q 16.70	Q 634.60
Bomba periférica 1/4 hp	unidad	1	Q 468.99	Q 468.99
Válvulas de balance de 1"	unidad	1	Q 267.80	Q 267.80
Válvulas de alivio de 1"	unidad	2	Q 392.60	Q 785.20
Mano de obra	Horas	48	Q 60.00	Q 2,880.00
Ingeniero supervisor	Horas	4	Q 200.00	Q 800.00
			Total	Q 17,068.59

Fuente: (Elaboración propia)

Cabe añadir que la cotización de la retroexcavadora fue un aproximado suponiendo un arreglo tipo simple horizontal. El costo por hora de la retroexcavadora junto con su operador, fue cotizado a *Mazatrac S.A.* La mano de obra fue un costo aproximado de lo que cobra un albañil en obras residenciales. Los costos de la bomba y las válvulas, fueron obtenidas de *Novex, Guatemala*.

Luego, suponiendo una operación diaria de una hora de la bomba, se obtiene el siguiente consumo de energía para el sistema geotérmico. El costo de la energía fue obtenido de las proyecciones de precio spot de EEGSA, Guatemala.

**Cuadro 12. Consumo energético de la bomba**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Monto
Consumo de la bomba	kW-h	0.4445	Q 1.28	Q 0.57
			Consumo mensual	Q 17.07

Fuente: (Elaboración propia)

Esto quiere decir que, si una bomba opera a una capacidad de 60l/min durante una hora, se generan 3,600l. Esto quiere decir que con una hora de uso se pueden bañar aproximadamente 31 personas. Cada persona en promedio tarda 7.7 minutos por ducha, según Gauley, a 15l/min da un consumo de 115.5l por persona.

Luego, se obtiene un consumo de un calentador típico eléctrico.

**Cuadro 13. Consumo del calentador eléctrico convencional**

Descripción	Precio
Calentador eléctrico	Q 3,599.00
Consumo diario	Q 30.21
Consumo mensual	Q 906.24

Fuente: (Elaboración propia)

Por lo que al final, el análisis financiero se resume en el Cuadro 14.

**Cuadro 14. Estimación del retorno económico del sistema geotérmico.**

Ahorro mensual	Q 889.17
Diferencia de inversión	Q 13,469.59
Meses de retorno	15.1484776
Años de retorno	1.26237313

Fuente: (Elaboración propia)

Por lo que se concluye que, con el sistema geotérmico de baja entalpía, se obtiene un ahorro mensual aproximado de Q889.17 para 31 personas y, un retorno de la inversión en un tiempo de 1.3 años.

### 7.1. Resultados del sistema real

#### 7.1.1. Dimensionamiento del sistema real

A continuación, en el Cuadro 15, se muestran los resultados del sistema real.

**Cuadro 15. Dimensionamiento del sistema real.**

Descripción	Valor	Unidad
Profundidad del pozo	6	m
Temperatura del pozo	25	°C
Temperatura de entrada del agua	13	°C
Temperatura de salida del agua	21	°C
Longitud del intercambiador de calor	33.12	m
Dimensión de la bomba	1/4	HP
Demanda energética	16.19	kW

Fuente: (Elaboración propia)

### 7.1.2. Arreglo del intercambiador de calor

A continuación, en el Cuadro 16, se muestran los resultados del arreglo para el intercambiador de calor enterrado.

**Cuadro 16. Arreglo del intercambio de calor.**

Descripción	Valor
Material de la tubería	PE <sub>100</sub> PN <sub>10</sub>
Diámetro nominal de la tubería	1"
Configuración	Simple horizontal
Número de secciones	4
Número de retornos 180°	3
Longitud de cada retorno	1.5m
Separación entre secciones	0.5m
Longitud de cada sección	6.875m

Fuente: (Elaboración propia)

### 7.2. Resultados del sistema a escala

A continuación, en el Cuadro 17, se muestran los resultados del sistema a escala.

**Cuadro 17. Resultados del sistema a escala.**

Descripción	Valor	Unidad
Longitud del intercambiador de calor	3	m
Cabeza de la bomba	1.3	m
Diámetro nominal de la tubería	1/4	Pulgada
Temperatura de entrada del agua	22	°C
Temperatura de salida del agua	23.8	°C
Temperatura del recipiente geotérmico	38	°C
Ganancia energética	377.1	W
Eficiencia	62	%

Fuente: (Elaboración propia)

### 7.3. Resultados del análisis financiero

A continuación, en el Cuadro 18, se muestran los resultados comparativos del análisis financiero, para observar la viabilidad de la implementación de un sistema real.

**Cuadro 18. Resultados del análisis financiero**

Sistema calefactor	Inversión inicial (Q)	Costo mensual (Q)	Consumo de energía diario (kW-h)	Tiempo de operación al día (h)
Geotérmico	17068.59	17.07	0.4445	1
Eléctrico	3599	906.24	23.6	1

Fuente: (Elaboración propia)

---

### Discusión de resultados

---

El objetivo principal de este proyecto fue diseñar un sistema real y, fabricar un prototipo de calefactor de agua residencial, aprovechando la energía geotérmica de baja entalpía en Guatemala, capaz de disminuir el consumo energético de los calentadores convencionales.

La implementación de sistemas que aprovechen fuentes de energía renovable es indispensable para el desarrollo de un país, ya que conlleva a la transición energética. La transición entre el uso de métodos convencionales para la generación de energía y otros medios de índole renovable es indispensable para la reducción de costos asociados al consumo de energía eléctrica, debido al efecto de las energías renovables en el precio spot de la energía. En este caso este sistema ayuda a la disminución de gases de efecto invernadero ya que, un calentador eléctrico en Guatemala, puede ser alimentado por energía que proviene a base de carbón, coque de petróleo, bagazo de caña, entre otros. Por ejemplo, en el caso de que la energía haya sido generada a base de coque de petróleo, este sistema es capaz de disminuir 2,958 *kg CO<sub>2</sub>* anuales. (Generalidad de Cataluña, 2022)

La geotermia de baja entalpía recaba el calor almacenado por la radiación solar a bajas profundidades, aprovechando temperaturas relativamente altas para sistemas como el planteado en este proyecto.

Como primer punto respecto a los resultados, se logró diseñar un sistema que, por medio de un intercambiador de calor enterrado de 33.12 metros que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía, satisface las necesidades de agua para aseo personal de aproximadamente 31 personas de escasos recursos en la zona de Atilán. Esto lo logra entregando un caudal constante de 60 litros por minuto, a una temperatura constante de 21°C, con una demanda energética de 16.19kW. Las dimensiones y especificaciones de dicho sistema, se muestran en el Cuadro 15.

Con respecto a la dimensión de la bomba, resulta ser mucho mayor a la necesitada para llevar el agua hasta el desarenador. La razón de la elección de esta bomba, es que su finalidad es aprovechar su alto caudal de salida para poder enviar toda el agua a 21°C a un tanque aislado, donde se pueda almacenar el agua caliente mientras que la gente no la utiliza. Esto conlleva a la viabilidad de que los usuarios del sistema puedan tener agua caliente en cualquier momento sin necesidad de accionar el sistema. Por otro lado, es importante que, en este pozo o tanque aislado, se tenga un flote. Esto con la finalidad de accionar la bomba en el momento que se necesite agua y que deje de operar cuando el tanque se encuentra aislado.

El arreglo de la tubería se muestra en el Cuadro 16. La tubería adecuada de dicho intercambiador de calor enterrado es el polietileno de alta densidad. Específicamente  $PE_{100} PN_{10}$  de 1'' de diámetro nominal. Esto gracias a la flexibilidad del material, resistencia térmica y su resistencia a la corrosión, ya que un material bajo tierra tiende a corroerse debido a la humedad y las partículas desgastantes del suelo. El arreglo adecuado para dicho intercambiador es un horizontal simple, con 4 secciones de 6.875 metros cada una. Además, con 3 retornos de 180°C con longitud de 1.5 metros. El arreglo fue el más adecuado ya que se mantiene un balance entre las pérdidas de presión por los retornos, y un área de excavación no tan elevada, esto es importante ya que, para realizar el pozo geotérmico, se debe de tomar en cuenta el terreno disponible para realizar la excavación.

Con el objetivo de satisfacer a las personas en la época de invierno de esta localidad, se utilizaron los datos de *Weather Spark*, que es una lectura de datos de todos los días del año. Cabe mencionar que este sistema es viable únicamente para invierno, ya que en épocas de verano la temperatura se eleva aproximadamente a 22°C. Debido a esto no tiene sentido utilizar el sistema calefactor en temporadas de verano, ya que la temperatura de salida del sistema es casi la misma temperatura que la temperatura ambiente de dicha temporada.

En otros países, se hacen proyectos similares con ductos de aire. Estos consisten en que, por medio de tiro natural por la diferencia de presiones, el aire fluya por una tubería bajo tierra, intercambie calor y climatice las horas de los ciudadanos. Esto resulta ser muy provechoso debido a que las temperaturas oscilan con una cifra mayor entre sus máximos y sus mínimos. Por lo que, debido al efecto embudo, siempre se tiene una temperatura media en un pozo geotérmico de baja entalpía.

Por ejemplo, en Francia, las temperaturas de los inviernos suelen llegar hasta 1°C y, en verano, las temperaturas suelen aumentar hasta los 39°C. Debido a esto, un sistema como el diseñado en este proyecto, sería de mucho provecho para tener agua caliente en invierno y agua fría en verano.

La metodología de pruebas fue, elevar la temperatura del pozo geotérmico hasta la deseada, retirar la resistencia eléctrica y de manera inmediata abrir la válvula de balance para operar el sistema y tomar la temperatura de salida.

Respecto al sistema a escala construido, cuyos resultados se muestran en el cuadro 17. Se logró obtener una eficiencia de 62%. La principal pérdida de este sistema a escala, fue que el agua que asumió la función del pozo geotérmico, se encontraba en constante intercambio de calor con el ambiente, por lo que no se tenían pérdidas de calor durante las pruebas.

Luego, cabe añadir que no se logró un diferencial de temperatura muy alto entre la temperatura de entrada y salida del sistema. Esto se debió a que el sistema resultó ser muy bajo para obtener una ganancia de calor alta. No obstante, el calor ganado fue significativo y esto se debe a que el agua posee un calor específico bastante alto respecto a otras sustancias líquidas como el alcohol, la glicerina, el aceite, entre otros.

Por otro lado, cabe mencionar que la bomba para el sistema a escala no fue la más adecuada debido a que era una bomba para fuentes. La razón por la cual se utilizó esta bomba fue porque las otras bombas centrífugas y periféricas, poseen una potencia y una cabeza muy elevadas, por lo que no eran adecuadas para cumplir la función de circular el agua en el sistema. Esto conllevó a que el flujo de salida fuera muy bajo, de 3 litros por minuto, por lo que no se logró un flujo turbulento y esto disminuye el intercambio de calor entre el pozo geotérmico y el agua circulante dentro del intercambiador de calor enterrado.

Finalmente, en el Cuadro 18 se muestran los resultados del análisis financiero.

Como primer punto, es pertinente hacer mención que la inversión de realizar un sistema calefactor que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía, resulta tener un costo muy elevado. Esto se debe mayormente a que el alquiler una máquina retroexcavadora con un operador, tiene un costo muy alto. No obstante, cuando se comparan los costos mensuales, resulta llamativo el ahorro tan grande que se genera a comparación de un calentador eléctrico convencional. Es por esto que se puede establecer que sí resulta viable implementar un sistema como el diseñado en este proyecto, ya que vale la pena, tanto el ahorro energético como el financiero.

Una vez teniendo el sistema instalado y funcionando, es importante realizarle mantenimiento preventivo a la bomba centrífuga cada cierto tiempo, ya que la parte enterrada no necesita ningún tipo de mantenimiento. De ser este mantenimiento adecuado, se puede garantizar una larga vida para el sistema. (IDAE, 2012)

Además, nuevamente es importante recalcar que, al usar energías renovables, se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que el efecto de energías renovables y disminuye la operación de plantas generadoras base de la matriz energética, que generan energía eléctrica a base de combustibles fósiles.

Por último, cabe añadir que personas de escasos recursos no tienen la posibilidad de pagar por un proyecto tan caro. Es por esto que un diseño de un sistema como el de este proyecto, resultaría coherente como parte de un proyecto gubernamental, con el fin de llevar agua a una temperatura cómoda, a sus ciudadanos en Atilán.

## Capítulo 9

---

### Conclusiones

---

- Se logró diseñar un sistema real calefactor de agua residencial, capaz de brindar agua a una temperatura constante de 21°C, que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía por medio de un intercambiador de calor enterrado de 32.12 metros en Atitlán, Guatemala.
- Se fabricó un prototipo de un calefactor de agua residencial que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía, cuya eficiencia real fue de 62%.
- Se logró determinar un caudal de salida adecuado de 60 litros por minuto, para el sistema de calentamiento de agua.
- Se logró establecer las etapas necesarias del sistema real necesarias para elevar la temperatura del agua, así como también se definieron sus propiedades termodinámicas.
- La demanda necesaria del sistema para extracción del pozo geotérmico resultó ser de 16.19kW.
- Se concluye que el proyecto es viable, ya que disminuye casi el 98% del consumo eléctrico de un calentador eléctrico convencional, estableciendo un ahorro mensual de Q889.17.

## Capítulo 10

---

### Recomendaciones

---

- Replicar el prototipo a una escala con dimensiones más considerables, con el fin de obtener datos más certeros sobre la eficiencia de un sistema calefactor geotérmico de baja entalpía.
- Seguir la metodología de este proyecto para construir un intercambiador de calor en un país que tenga una oscilación de temperaturas anuales mayor a 20°C.
- Desarrollar sistemas calefactores geotérmicos de baja entalpía en Guatemala, para así satisfacer las necesidades de saneamiento básico de la gente de escasos recursos, disminuyendo el consumo de energía de los calentadores eléctricos convencionales.
- Darles seguimiento a los suelos de zonas geotérmicas, para evaluar la posibilidad de optimizar la profundidad, para implementar un calefactor geotérmico.

## Capítulo 11

---

### Bibliografía

---

Afsaneh, N. & Abbas, N. (2019) *Exergoeconomic comparison and optimization of organic Rankine cycle, trilateral Rankine cycle and transcritical carbon dioxide cycle for heat recovery of low-temperature geothermal water*.

Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J., Green, C., Xue, P. & Vitton, S. (2014) *Field tests and multiphysics analysis of a flooded shaft for geothermal applications with mine water*.

Barrero Fernández, Antonio (2003). *Energías Renovables para Todos: Energía Geotérmica y del Mar*. Edición Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

Calderón, J. (2005) *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Cárcel, F. (2015) *Applications of the Geothermal Energy of Low Temperature*.

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (4a. ed.) México D.F.: McGraw Hill.

Departamento de acción climática, alimentación y área rural. (2022) *Guía para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. Generalidad de Cataluña, España.

Farr, G., Sadasivam, S., Manju, Watson, I., Thomas, H. & Tucker, D. (2016) *Low enthalpy heat recovery potential from coal mine discharges in the South Wales Coalfield*.

Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala. (2022). Informe del estado del agua de la Región Metropolitana de Guatemala 2022: el agua nos une. Guatemala.

Gatica, K. (2019) *Uso de Energía Geotérmica de baja entalpía como alternativa para sistemas de calefacción de agua en piscinas*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12204/1/Karen%20Aracely%20Gatica%20Solares.pdf>

Gauley, B. (2017) *Residential showering Time-of-Day Analysis*. Independent MaP Research

Gunawan, Y. & Putra, N. (2007) *Withering of tea leaves using heat pipe heat exchanger by utilizing low-temperature geothermal energy*.

Instituto para la diversificación y ahorro de energía. (2012) *Guía técnica. Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Ministerio de industria, energía y turismo. Gobierno de España.

Mac-Lean, C., Cabezas, R., Muñoz, M. & Vargas, L. (2018) *Applications of low enthalpy geothermal energy*. Universidad de Chile, Chile.

Ministerio de energía y minas de Guatemala, MEM. (2018) *Energía Geotérmica*. Dirección general de energías, República de Guatemala.

Ministerio de energía y minas de Guatemala, MEM. (2015) *Recursos Geotérmicos de Guatemala*. Dirección general de energías, departamento de energías renovables.

Rey, D. & Alonso, T. (2014) *Determinación de la difusividad térmica del subsuelo mediante medidas de temperatura*. Universidad de Oviedo, Oviedo, España

Seisdedos, M. (2012) *Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea, aspectos a considerar en el contexto local*. Universidad de Chile, Chile.

Wan Erdeweghe, V. & Van Bael, J. (2018) *Optimal combined heat-and-power plant for a low-temperature geothermal source*.

Weather Spark. *El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo*.  
<https://es.weatherspark.com>

Yu, Z. & Guo, L. (2016) *Feasibility analysis of a medium- to low-temperature enhanced geothermal combined with heat pump system (MLEGHP) for heating application in severely cold regions: a case study in Shenyang, Northeastern China*.  
<http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=13&sid=65661015-1c1c-4206-a27c-150a2e62e1ee%40sdc-v-sessmgr03>

**Imagen 1. Prototipo del sistema calefactor.**



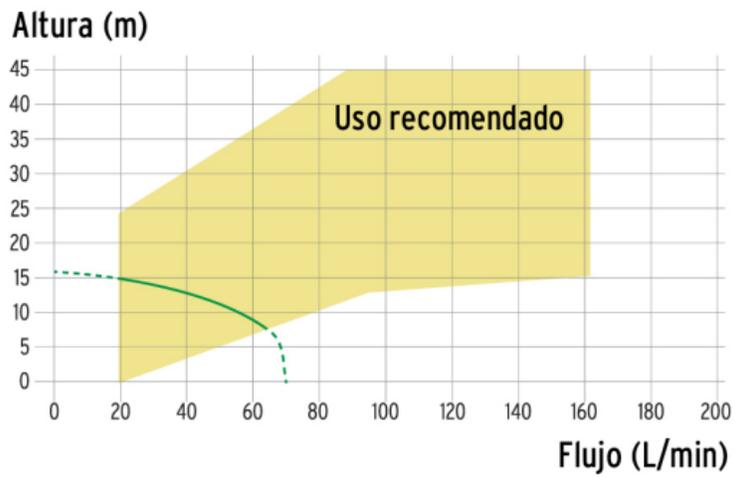
**Imagen 2. Bomba de 1.3m utilizada en el prototipo.**



**Imagen 3. Arreglo del intercambiador del protipo**



**Imagen 4. Diagrama de rendimiento de la bomba real**



Fuente: (Trupper, 2022)