



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA
SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS**

Inga. Karen Aracely Gatica Solares

Asesorado por la Ph.D. Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA
PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

INGA. KAREN ARACELY GATICA SOLARES

ASESORADO POR LA Ph.D. INGA. CASTA PETRONA ZECEÑA ZECEÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Perez
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS

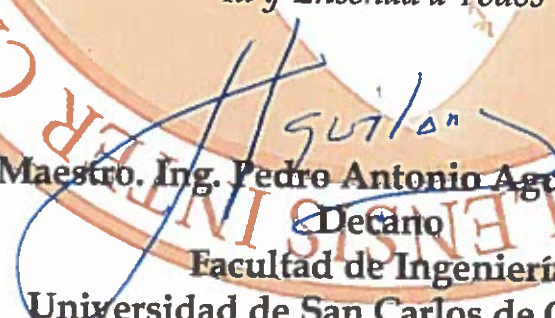
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrados de Ingeniería, con fecha 06 de abril de 2017.


Inga. Karen Aracely Gatica Solares

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS"** presentado por la Ingeniera Química Karen Aracely Gatica Solares quien se identifica con Carné 201113849, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado **"USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS"** presentado por la Ingeniera Química Karen Aracely Gatica Solares, quien se identifica con Carné 201115849, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Edgar Dario Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **“USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS”** presentado por la Ingeniera Química Karen Aracely Gatica Solares quien se identifica con Carné 200413327.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Maestro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, abril de 2019.

Cc: archivo/LZ.LA.

En mi calidad como Asesora de la Ingeniera Química Karen Aracely Gatica Solares quien se identifica con carné No. 201113849 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA COMO ALTERNATIVA PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE AGUA EN PISCINAS"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Doctora. Inga. Casta Petrona Zecaña Zecaña
Asesor(a)

Doctorado en Educación con Énfasis en Mediación Pedagógica

Dra. MSc. Ing.

Casta Zecaña Zecaña
624

Guatemala, abril de 2019.

Cc: archivo/LZLA.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su infinita gracia, misericordia y amor. Por darme la fortaleza, temple y sabiduría para alcanzar esta meta.

Virgen María

Por guiar mis pasos en los momentos más difíciles de la vida, y por interceder por mí ante tu hijo Jesús.

Mi padre

Jaime Arturo Gatica García, tu ejemplo dedicación e infinito amor serán siempre mi mayor inspiración. Por enseñarme a luchar por lo que quiero, y a ser perseverante ante cualquier adversidad. Te amo.

Mi madre

Milvia Aracely Solares de Gatica, por enseñarme el valor de la vida y el amor verdadero. Gracias mamá, por ser mi mejor amiga, mi consuelo y mi fortaleza. Porque con tu ejemplo he aprendido a trascender y buscar la excelencia. Sin ti no sería la mujer que ahora soy. Te amo.

Mis hermanos

Claudia, Mercedes y Ángel Gatica Solares, por llenar mi vida de felicidad, ser mis eternos compañeros y fieles cómplices.

Mi abuela

Blanca Estela Solares, por su inmenso amor y cuidados. Usted siempre será mi mayor ejemplo de superación y nobleza.

Mi abuela

Marta Raquel García vda. de Gatica (q. e. p. d.), quien desde el cielo celebra con nosotros. Por enseñarme el valor del servicio.

Mis tíos

Rafael Morales, Jorge Morales, Angélica de Evans, Gilda Gatica, Irma de Quezada y Edgar Gatica, por estar siempre presentes en mi vida.

Mis primos

Por su cariño y apoyo.

Diego Cabrera

Por todo tu cariño, que me ha ayudado a seguir adelante. Gracias por enseñarme el valor de la verdadera amistad. Te quiero.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudio que inculcó los valores que han definido mi éxito profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento que permite mi ejercicio profesional.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por brindarme las herramientas para continuar mi desarrollo.
Mi asesora	Ph.D. Casta Zeceña, por su apoyo, comprensión y paciencia en la constante revisión y asesoría de esta investigación. Por alentarme a la excelencia y a siempre seguir adelante.
Mis profesores	Por ser el vínculo entre el conocimiento y la enseñanza. Especialmente al Ing. José Antonio Rosal Chicas, por su dedicación en la constante revisión de este informe.
A todos los que colaboraron con mi formación	Por su apoyo. Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXII
INTRODUCCIÓN	XXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXV

1.	MARCO TEÓRICO.....	1
1.1.	Eficiencia energética.....	1
1.2.	Energía renovable en instalaciones.....	2
1.3.	Climatización de piscinas	2
1.3.1.	Sistemas para climatización de piscinas.....	3
1.3.2.	Geotermia	4
1.3.3.	Tipos de energía geotérmica	4
1.4.	Acondicionamiento geotérmico de baja entalpía	5
1.4.1.	Bomba de calor.....	6
1.4.2.	Tipos de captaciones.....	7
1.4.2.1.	Captación abierta	8
1.4.2.2.	Captación cerrada	8

1.5.	Sistemas de bomba de calor geotérmica como herramienta de ahorro energético	9
1.6.	La geotermia en Guatemala	10
1.7.	Legislación en Guatemala	11
2.	DELIMITACIÓN DEL ÁREA OBJETIVO	13
2.1.	Potencial geotérmico en Guatemala	13
3.	CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.....	15
3.1.	Pérdidas por evaporación del agua del vaso.....	16
3.2.	Pérdidas por radiación	17
3.3.	Pérdidas por convección	18
3.4.	Pérdidas por renovación de agua.....	18
3.5.	Pérdidas por transmisión.....	19
3.6.	Ganancias por radiación solar	20
4.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR INTERCAMBIADOR DE CALOR GEOTÉRMICO	21
4.1.	Fundamentos térmicos del terreno	21
4.1.1.	Evolución de la temperatura del terreno	21
4.1.2.	Propiedades térmicas del terreno.....	22
4.2.	Diseño del intercambiador de calor enterrado.....	23
4.2.1.	Elección de la bomba de calor	24
4.2.2.	Elección del fluido circulante	24
4.2.3.	Elección de la configuración a emplear	24
4.2.4.	Elección de los tubos	25

4.2.5.	Dimensionamiento del intercambiador de calor	25
5.	ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA IMPLEMENTACIÓN	31
6.	RESULTADOS	33
6.1.	Caracterización de la potencia requerida para cubrir la demanda energética	33
6.2.	Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado	34
6.3.	Análisis económico	34
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
	CONCLUSIONES	41
	RECOMENDACIONES	43
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
	ANEXOS	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo termodinámico de una bomba de calor.	7
2.	Mapa de áreas con potencial geotérmico de la República de Guatemala.....	14
3.	Esquema del flujo de pérdidas de calor en el vaso	15
4.	Curva de embudo, evolución de la temperatura del suelo.	22
5.	Variación de las temperaturas máximas y mínimas de la tierra con la profundidad	26
6.	Diagrama de equipo de la instalación para calefacción con base en energía geotérmica	29
7.	Caracterización de la potencia requerida para cubrir la demanda energética por transferencia de calor (pérdidas y ganancias)	33
8.	Comparación del sistema de calefacción convencional respecto a la alternativa propuesta.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Datos técnicos de áreas geotérmicas en la República de Guatemala	13
II.	Datos para cálculo de la pérdida de calor por evaporación de agua.....	17
III.	Datos para cálculo de la pérdida de calor por radiación.....	17
IV.	Datos para cálculo de la pérdida de calor por convección	18
V.	Datos para cálculo de la pérdida de calor por renovación.....	19
VI.	Datos para cálculo de la pérdida de calor por transmisión.....	19
VII.	Datos para determinar la longitud aproximada de la tubería.....	27
VIII.	Especificaciones técnicas de la bomba de circulación	28
IX.	Estimación de costos	31
X.	Estimación de costos (continuación)	32
XI.	Caracterización según las pérdidas y ganancias de calor.....	33
XII.	Especificaciones técnicas del sistema de intercambio de calor de baja entalpía para la piscina olímpica	34
XIII.	Comparación económica del sistema de calefacción convencional respecto a la alternativa propuesta	34
XIV.	Ahorro energético obtenido mediante la implementación del sistema de calefacción con base en energía geotérmica respecto al uso de bombas de calor eléctricas.....	35
XV.	Temperaturas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos.....	49
XVI.	Temperaturas máximas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos	50
XVII.	Temperaturas mínimas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos	51

XVIII.	Humedades relativas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos	52
XIX.	Humedad absoluta del aire saturado a distintas temperaturas	53
XX.	Especificaciones de la Federación Internacional de Natación, para una piscina olímpica	53
XXI.	Temperatura máxima y mínima de la tierra en función de la profundidad, para el área de estudio	54
XXII.	Temperatura máxima y mínima de la tierra en función de la profundidad (continuación)	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_e	Calor específico del agua ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
COP	Coeficiente óptimo de desempeño
C_T	Coeficiente de transmisión de muros ($W\ m^{-2}\ ^\circ C$), acabado de azulejo y hormigón
C_{vap}	Calor de vaporización del agua para una temperatura de $25\ ^\circ C$ en ($W\ kg^{-1}$)
D	Constante de Stefan-Boltzmann ($W\ m^{-2}\ K^{-4}$)
ρ	Densidad del agua a la temperatura establecida dentro del vaso ($kg\ m^{-3}$)
E	Emisividad de la superficie (agua)
F_{utilización}	Factor de utilización
G_a	Saturación masiva (%)
ln	Logaritmo natural
n	Número de nadadores por m^2 de superficie de lámina de agua
Q_{calefacción}	Calor de calefacción, demanda térmica (W)
Q_e	Pérdidas por evaporación del agua del vaso (W)
Q_r	Pérdidas por radiación de calor por diferencias de temperatura (W)
Q_c	Pérdidas por convección de calor entre agua y aire (W)
Q_{re}	Pérdidas renovación del agua del vaso (W)

Q_t	Pérdidas por transmisión de calor del agua del vaso (W)
R_p	Resistencia de los tubos al flujo de calor ($K (W m^{-1})^{-1}$)
R_s	Resistencia de la tierra ($K (W m^{-1})^{-1}$)
R_s	Ganancias por radiación solar (W)
S	Superficie de la piscina en (m^2)
Sc	Superficie de cerramiento del vaso (m^2)
T_a	Temperatura ambiente (K)
T_{ag}	Temperatura del agua (K)
T_c	Temperatura superficial de los cerramientos (K)
T_{ex}	Temperatura del exterior del cerramiento (K)
T_L	Temperatura mínima de la tierra ($^{\circ}C$)
T_{mín}	Temperatura mínima del fluido ($^{\circ}C$)
T_x	Temperatura del agua de la red (K)
V_r	Caudal de agua de renovación ($m^3 s^{-1}$), usualmente 5 % del volumen del vaso en un día
W_{as}	Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura ambiente ($kg_{agua} kg_{aire}^{-1}$)
W_e	Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua ($kg_{agua} kg_{aire}^{-1}$)

GLOSARIO

Conductividad térmica	Es el flujo de calor transmitido por conducción, a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de un Kelvin por metro.
Difusividad térmica	Ratio entre la capacidad de conducción del terreno y su capacidad térmica.
Entalpía	Parámetro termodinámico que indica el contenido de energía útil de una sustancia.
Geotermia	Energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento de calor del interior de la Tierra.
Gradiente geotérmico	Es la variación de temperatura en función de la profundidad.
<i>Slinky</i>	Configuración variante de la horizontal que consiste en disponer la tubería formando bucles o espiras.
Vaso de la piscina	Estructura de la piscina que contiene el agua.

GLOSARIO

COP	Ratio que indica la relación entre la potencia térmica producida por la bomba de calor y la potencia eléctrica consumida para suministrarla.
FINA	Federación Internacional de Natación.
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
NPSH	Cabeza neta de succión positiva.

RESUMEN

Con el objetivo de proporcionar una alternativa energética para los sistemas de climatización en piscinas que reduzca el consumo de energía eléctrica y aumente la eficiencia del proceso de calefacción, se presenta el diseño de un sistema de calefacción de agua con base en energía geotérmica de baja entalpía.

Para el desarrollo del diseño, se determinó la caracterización de la demanda energética de una piscina de categoría olímpica, para mantener la temperatura del agua entre los parámetros óptimos, para la práctica de las disciplinas deportivas acuáticas, siendo estos entre 24 y 28 °C. La misma se realizó mediante el estudio de pérdidas y ganancias de calor en el sistema.

En el estudio se muestra una metodología para el diseño de un intercambiador de calor enterrado, que aprovecha la energía de baja entalpía del suelo para cubrir las necesidades energéticas de calefacción. Así, luego de definir las propiedades térmicas del terreno y seleccionar el material adecuado para la implementación del sistema, se determinó la longitud óptima de tubería que permite la transferencia de calor, así como la configuración adecuada de la misma, para aprovechar los recursos disponibles.

Este sistema se comparó con una tecnología con base en energía convencional, estableciendo el ahorro energético obtenido al implementar el intercambiador de calor enterrado. Posteriormente, se determinó el período en el cual se pagaría la inversión necesaria para la implementación del sistema propuesto con base en el ahorro obtenido por la disminución del consumo energético.

Finalmente, se concluye que este sistema es una opción viable técnica y económicamente, presentando una alternativa altamente eficiente a los sistemas de calefacción que utilizan energía convencional.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acondicionamiento del agua para la práctica de disciplinas deportivas acuáticas es un elemento primordial para asegurar el correcto desempeño del atleta y su integridad física, y así lograr su óptimo desarrollo. Por esto, es necesario garantizar que la temperatura del agua se encuentre entre 24 y 28 °C durante el tiempo que los atletas hagan uso de la piscina. El Reglamento Técnico de Instalaciones de la Federación Internacional de Natación, indica que los sistemas de calefacción de piscinas al aire libre deben funcionar con alternativas de energía renovable. Sin embargo, en Guatemala es común que las piscinas dispongan de un sistema de calefacción conformado por una caldera pirotubular accionada por diésel y un sistema adicional de bombas de calor, que permiten que la temperatura del agua se conserve en un mayor tiempo, utilizando energía eléctrica para su funcionamiento.

Según datos estimados para la Piscina Olímpica Vista Hermosa, correspondientes a un sistema de calefacción que combina seis bombas de calor y caldera diésel, el consumo energético estimado del sistema de bombas de calor es de 12.660,48 kWh por día, siendo utilizado 16 horas diarias; para mantener una temperatura del agua aproximada que oscila entre los 25 y 26 °C. Asimismo, cuando la temperatura ambiente es inferior a 18 °C, se utiliza una caldera pirotubular con un consumo estimado de 11 gal h⁻¹, durante 20 horas, para elevar la temperatura del agua aproximadamente 1°C.

Con los avances en la tecnología de calefacción de agua para piscinas, las bombas de calor eléctricas eficientes, recomendadas para una piscina de categoría olímpica, tienen una capacidad de 140.000 BTU h⁻¹.

El uso de sistemas de calefacción con base en combustibles fósiles aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global y al porcentaje de desechos particulados en el ambiente y su consecuente gasto económico. A pesar de esto, en Guatemala, no existen proyectos que incluyan una alternativa energéticamente eficiente para sistemas de calefacción de agua de piscinas, que utilice energía geotérmica de baja entalpía.

Asimismo, si los sistemas se encuentran fuera del tiempo de vida útil, sin un programa de mantenimiento preventivo que minimice su deterioro y maximice el tiempo de vida de los equipos, disminuye la eficiencia térmica del sistema de calefacción, aumentando el consumo energético y generando contaminación sonora, térmica y visual en el ambiente.

Pregunta principal

¿Qué alternativa de sistema de energía geotérmica de baja entalpía puede utilizarse para la calefacción de agua para piscinas y qué porcentaje del consumo energético con base en energía convencional podría reducirse?

Preguntas auxiliares

1. ¿Cuál es el consumo energético en el sistema de calefacción del agua de una piscina de categoría olímpica?
2. ¿Cuál será el diseño de un sistema de calefacción con un intercambiador de calor geotérmico de baja entalpía que permitan la conservación de la temperatura en el agua de la piscina?

3. ¿Cuánto sería el ahorro energético obtenido, mediante la implementación de energía geotérmica en el sistema de calefacción de la piscina?

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de calefacción de agua con base en energía geotérmica de baja entalpía, con capacidad para reducir el consumo energético en una piscina de categoría olímpica, ubicada en una zona con potencial geotérmico, aumentando la eficiencia energética.

Específicos

1. Calcular el consumo energético del sistema de calefacción de una piscina de categoría olímpica, necesario para conservar la temperatura en el agua entre 24 y 28 °C.
2. Diseñar un sistema de calefacción con un intercambiador de calor geotérmico de baja entalpía, que permita la conservación de la temperatura en el agua, mejorando la eficiencia del sistema de transferencia de calor.
3. Determinar el porcentaje de ahorro energético a obtener si se implementa el sistema de calefacción con base en energía geotérmica en una piscina de categoría olímpica.

HIPÓTESIS

El estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, por lo tanto, no se planteará hipótesis de investigación.

INTRODUCCIÓN

La práctica deportiva de disciplinas acuáticas requiere que la temperatura del agua de la piscina se encuentre en un rango establecido para que el desempeño de los atletas sea el adecuado. Para este efecto, es necesario incorporar sistemas de climatización en la instalación, que sean capaces de cubrir la demanda energética necesaria para mantener la temperatura del agua en la piscina. El Reglamento Técnico de Instalaciones de la Federación Internacional de Natación, establece que el sistema de calefacción de piscinas descubiertas debe funcionar con energía renovable.

Con el objetivo de aportar una solución a esta problemática, se presenta un diseño general para incorporar energía geotérmica de baja entalpía en los sistemas de climatización de piscinas olímpicas por medio de un intercambiador de calor enterrado.

Este diseño permite establecer una línea base para la utilización de esta alternativa energética, estableciendo las condiciones preliminares para el escalamiento de proyectos y su incorporación en instalaciones análogas al ejemplo didáctico presentado. Asimismo, se propone una metodología que permite establecer los parámetros básicos de diseño para la instalación de este sistema de calefacción alternativo.

La metodología incluye el procedimiento para la caracterización de la demanda energética y el proceso de diseño del sistema de intercambio de calor enterrado, así como un diseño didáctico, con datos de referencia para una piscina de categoría olímpica, ubicada en una zona con potencial geotérmico en

Guatemala. Se tomó como referencia la guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica de la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

En el capítulo 1, se muestra el marco teórico y conceptual de la investigación que ha sido utilizado como referencia para el desarrollo de esta. El capítulo 2 muestra la delimitación del área objetivo, según el potencial geotérmico para la implementación de este sistema. La caracterización de la demanda energética, así como la metodología para su determinación, se establecen en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se presenta un diseño didáctico para la incorporación de un sistema de calefacción que utilice energía geotérmica de baja entalpía en una piscina olímpica. Se presenta la metodología para el establecimiento de los fundamentos térmicos del terreno y la propuesta de diseño de intercambiador de calor enterrado. Asimismo, se presenta una estimación de los costos para la implementación del sistema en el capítulo 5. Estos aspectos, se resumen y discuten en los capítulos 6 y 7, estableciendo y analizando la viabilidad del proyecto.

Finalmente, se concluye respecto a la viabilidad de esta alternativa energética y se proporcionan las recomendaciones consideradas.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, el mismo considera el diseño de un sistema de calefacción con energía geotérmica de baja entalpía y sus componentes, mediante la medición de conceptos y definición de variables.

El acondicionamiento del agua en la práctica deportiva es un elemento primordial para garantizar el correcto desempeño de los atletas. Las condiciones en las que debe permanecer el agua, incluyen parámetros fisicoquímicos y de sanitización, entre estos, la temperatura del fluido dentro de la piscina, según la Federación Internacional de Natación (FINA), debe oscilar entre 24 a 28 °C. Creando la necesidad de incorporar sistemas de calefacción para cumplir con este requerimiento.

La transición hacia el uso de tecnologías eficientemente energéticas en el sistema de calefacción de una piscina, significa una reducción en los costos y aumento en la rentabilidad.

Tras la evaluación de las alternativas energéticas disponibles en Guatemala, se proporciona un diseño del sistema de calefacción con base en energía geotérmica de baja entalpía, para una piscina de categoría olímpica, ubicada en una zona con potencial geotérmico. Así, se definieron las zonas a considerar con base en el “Catálogo de recursos geotérmicos de Guatemala” del Ministerio de Energía y Minas.

Se evaluó la demanda energética para climatización, para una piscina de categoría olímpica, utilizando como referencia las especificaciones descritas en

el “Reglamento técnico oficial” de la FINA. Esto se obtuvo mediante la estimación de las pérdidas de calor en el agua, siendo estas: evaporación de agua del vaso, radiación de calor por diferencias de temperatura, convección de calor entre agua y aire, renovación del agua del vaso, transmisión de calor del agua al vaso y ganancias por radiación solar; este último parámetro se despreció, ya que se refiere a ganancias térmicas que redundan su aporte en el mantenimiento de la temperatura del recinto. Estas pérdidas dependen principalmente de factores meteorológicos, como la temperatura y humedad del aire, por lo que se utilizó la base de datos de los registros históricos anuales del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Las variables psicrométricas se calcularon utilizando las cartas psicrométricas de la línea VALCON.

Para el diseño del sistema de calefacción, se utilizó la guía técnica “Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica”, del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía – IDAE – del Gobierno de España; tomando como referencia la caracterización de la demanda energética, previamente establecida.

Con este fin, fue necesario determinar los fundamentos térmicos del terreno, considerando la evolución de la temperatura con la profundidad establecida en la curva de embudo provista en la guía técnica, así como las propiedades térmicas del terreno. Estos parámetros permiten establecer el aprovechamiento térmico del terreno, por lo que se calculó, la conductividad según la Ley de Fourier, la capacidad térmica según el catálogo de recursos geotérmicos de Guatemala y la difusividad térmica, que es la relación entre las dos variables anteriores.

Con base en la caracterización de la demanda energética y los fundamentos térmicos del terreno, se seleccionó una bomba de calor adecuada,

según el coeficiente de rendimiento térmico y el calor absorbido. Se definió la configuración a emplear y las características de la tubería, para dimensionar el intercambiador de calor enterrado; determinando las temperaturas máximas y mínimas de la tierra y del fluido a la entrada de la bomba de calor, así como la diferencia de temperatura entre la tierra y el circuito, la resistencia de los tubos al flujo de calor, la resistencia de la tierra y el factor de utilización. Finalmente, se seleccionó la bomba de circulación.

Así, se propone un diseño alternativo para el sistema de calefacción del agua de una piscina de categoría olímpica en una zona con potencial geotérmico, como guía para la adecuación de los parámetros a las condiciones de una instalación en específico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Eficiencia energética

Jiménez (2009), menciona que la eficiencia energética se basa en buscar el desarrollo sostenible manteniendo el nivel de actividad, de transformación y de progreso, considerando que deben ajustarse las necesidades a los recursos existentes, evitando el derroche energético. Asimismo, indica que es posible identificar una relación lineal entre el consumo de energía y el grado de contaminación de un país.

Según Jiménez (2009), el consumo energético para sistemas de calefacción representa un porcentaje significativo y por ende un elevado coste inducido por una instalación durante su vida útil. Con el fin de brindar una solución a esta problemática a nivel de eficiencia energética, es posible optar por las siguientes vías:

- Reducir la demanda de calefacción mediante un adecuado diseño constructivo y una mejora de los sistemas de aislamiento que permita reducir las cargas térmicas de la instalación.
- La promoción de la calefacción a partir de fuentes renovables mediante equipos de elevada eficiencia energética.

1.2. Energía renovable en instalaciones

Para energizar instalaciones, no son utilizadas todas las energías renovables; generalmente, para estos usos se sintetizan la geotermia, la energía solar térmica y la biomasa. (Jiménez, 2009)

1.3. Climatización de piscinas

La climatización en una piscina se realiza con el objeto de alcanzar una temperatura de confort que permita utilizar la instalación con versatilidad, según el tiempo o el conjunto de condiciones climáticas.

Según el Reglamento de Instalaciones de la Federación Internacional de Natación y el Consejo Superior de Deportes de España (2005), “la temperatura del agua de todo vaso de natación para competencias y entrenamientos debe ser de 26 °C con una desviación de 1 °C”. Para este fin, si la piscina es cubierta, pueden utilizarse energías convencionales para el calentamiento del agua; sin embargo, si la piscina es descubierta únicamente pueden utilizarse alternativas renovables, como la energía solar, eólica, aguas termales o energía del terreno, para este fin.

Para la elección del sistema de calefacción para agua de la piscina a climatizar, deben considerarse principalmente dos aspectos, los costos en la instalación y el coste de la energía que supone la alternativa a elegir. Asimismo, deben considerarse los siguientes aspectos:

- El tiempo de aprovechamiento debe ser razonable, implicando que los rangos previstos de temperatura de los meses en los cuales se usará la instalación sean aceptables.

- Las noches no deben ser demasiado frías, porque el coste puede ser tan elevado, que provoque el fracaso del sistema. La temperatura estimada como mínima para la incorporación de un sistema de calefacción es de 15 °C.
- La piscina deberá protegerse en la noche con una cubierta o cobertor para que la temperatura se conserve, esto para evitar pérdidas que suponen que el sistema no sea eficiente.

1.3.1. Sistemas para climatización de piscinas

Existen diversos métodos y sistemas para climatizar el agua de una piscina, entre estos:

- Calentadores eléctricos: disponen de un termostato cuya función es controlar la temperatura de salida del agua, los calentadores se instalan en el circuito que impulsa el agua a la piscina y se ponen en funcionamiento mientras la depuración está en marcha. Por cada 10 m³ de agua a calentar, se calculan 1,5 kW.
- Calefacción solar: consiste en adaptar un circuito integrado con paneles para energía solar. Presenta la desventaja de ser un sistema dependiente de los factores climáticos del lugar y las horas sol.
- Intercambiadores de calor: este sistema de calefacción de agua dispone de dos circuitos, uno colecta agua de la impulsión y lo devuelve a la piscina, el otro es conectado al sistema para elevar o mantener la temperatura, como caldera a gas, gasóleo o un captador de energía solar y utiliza esta potencia para cubrir la demanda energética del agua.
- Bomba de calor: utiliza las propiedades de un fluido con propiedades refrigerantes, absorbiendo calor exterior y cediéndolo al circuito interior, como intercambio térmico. La ventaja principal de las bombas de calor es

su consumo energético bajo, comparado con los sistemas comunes. (Empresa *TU&CO*, 2016)

1.3.2. Geotermia

La energía geotérmica es aquella que puede obtenerse mediante el aprovechamiento de calor del interior de la tierra. Existen diferentes tipos de geotermia, siendo estos, de baja, media o alta entalpía. En esta última puede obtenerse electricidad. Este tipo de tecnología se diferencia de otras energías renovables en que es previsible, disponible en casi cualquier lugar y su aporte energético es constante. (Noguera, 2011, p. 8)

El calor geotérmico de baja entalpía, poca profundidad, se utiliza para aplicaciones domésticas y en el sector terciario. Las bombas de calor de nueva generación utilizan intercambiadores de calor instalados aproximadamente a cien metros bajo tierra, aprovechando la energía solar almacenada naturalmente en la corteza terrestre. Dado el sentido reversible de una bomba de calor, esta puede utilizarse en sistemas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria; por lo que son consideradas como un sistema energético con potencial en los países de clima continental. (Jiménez, 2009, p. 8)

En la corteza terrestre, el calor está contenido en la roca y el fluido que llena las fracturas y poros en la roca. Según la zona geográfica, la temperatura es diferente y determina el posible aprovechamiento energético. (MEM, 2015)

1.3.3. Tipos de energía geotérmica

Según el “Código Minero” en Francia, la clasificación tanto para la energía geotérmica, como para las explotaciones, los yacimientos y los recursos geotérmicos, se divide en:

- Alta temperatura: temperatura superior a 150°C, permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Media temperatura: entre 90 y 150°C, permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta las centrales.
- Baja temperatura: entre 30 y 90°C, su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas.
- Muy baja temperatura: menos de 30°C, puede ser utilizada para calefacción y climatización, es necesario el uso de bombas de calor.

1.4. Acondicionamiento geotérmico de baja entalpía

Seisdedos (2012), se refiere a la geotermia de baja o muy baja entalpía, como el estudio, ocurrencia y explotación de calor de baja temperatura, que se encuentra normalmente en el subsuelo a una relativamente baja profundidad, típicamente menor a 200 metros. Siendo el caso, la existencia de un componente de la energía geotérmica genuina proveniente del calor de profundidades de la tierra, pero generalmente, se denomina como la energía solar que ha sido absorbida y almacenada en el subsuelo.

Según Noguera (2011), la geotermia de baja temperatura puede ser aprovechada discretamente, pues no es necesario estar en un enclave geológico de mayor actividad. El subsuelo tiene la capacidad de conservar una temperatura sensiblemente constante, entre los diez y veinte metros de profundidad, a lo largo del año. En el subsuelo, la variación de temperatura respecto a la profundidad en épocas diversas del año es:

- “En invierno, a medida que aumenta la profundidad, la temperatura aumenta hasta alcanzar un valor fijo de 10 °C”.

- “En verano ocurre lo contrario; a medida que aumenta la profundidad la temperatura desciende hasta los 10 °C”.
- “En primavera y otoño las variaciones son menores, por lo tanto, es posible alcanzar, el mismo valor de 10 °C, independientemente de la profundidad”.

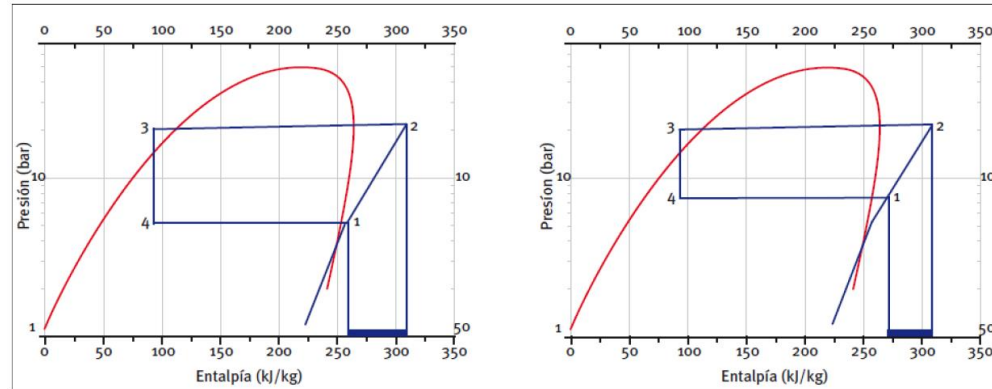
1.4.1. Bomba de calor

“Una bomba de calor es una máquina térmica que opera como un refrigerador inverso, es decir, para propósitos de calentamiento”. Estas extraen calor a una temperatura, como energía geotérmica de baja entalpía o un efluente industrial y la entregan a un nivel de temperatura más útil. (Gutiérrez, Barragán y Arellano, 2008)

El circuito termodinámico de la bomba de calor tiene cuatro etapas. El fluido se comprime y calienta, para después disipar el calor en un condensador; después, se expande en una válvula de expansión, se enfría, y por lo tanto puede absorber calor en el evaporador. Así, existe un condensador que cede calor al entorno y un evaporador que obtiene calor del entorno. Una bomba de calor geotérmica tiene el mismo circuito termodinámico, con la diferencia que el exterior es el subsuelo. En la figura 1, se muestra el ciclo termodinámico de una bomba de calor (marcado en azul), en un gráfico que muestra la variación de presión respecto a la entalpía. (Moratilla, 2015)

Un sistema de bomba de calor geotérmica tiene tres componentes principales: una bomba de calor, una conexión a tierra y un sistema interior de distribución de calor. (Schoennenbeck, 2014)

Figura 1. **Ciclo termodinámico de una bomba de calor**



Fuente: Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE.

1.4.2. Tipos de captaciones

Según Moratilla (2015), la geotermia de baja entalpía, por definición es la que está comprendida hasta las cotas de cuatrocientos metros, mientras que la de muy baja entalpía se da hasta los cien metros. Al explotar el recurso geotérmico de un terreno a poca temperatura, debe plantearse la ecuación de transferencia de calor para establecer el balance energético entre la demanda de la instalación y la oferta del terreno. Es necesario realizar la cuantificación de la energía potencial almacenada del terreno y la demanda energética de la instalación.

Para el análisis de los tipos de perforación, se establecen dos grupos principales: sistemas abiertos y cerrados. Los sistemas abiertos se caracterizan por explotar los recursos hídricos del subsuelo únicamente térmicamente, sin necesidad de emplear ningún caudal de estos, y los sistemas cerrados pueden ser horizontales o verticales, trabajando en circuito cerrado. (Moratilla, 2015)

1.4.2.1. Captación abierta

Para realizar un circuito abierto se perfora un mínimo de dos pozos, uno de extracción y otro de inyección, sin embargo, si el agua se devuelve a la superficie, en lugar de un acuífero original, se requiere directamente solo un pozo de extracción. (Moratilla, 2015)

1.4.2.2. Captación cerrada

Moratilla (2014), describe los distintos tipos de captación cerrada, siendo estos: horizontales y verticales.

- Captación horizontal: es el más simple de los sistemas cerrados. Consiste en una red de tubos desplegada en cotas entre -1,2 y -1,5 m, cuya superficie corresponde a entre 1,5 y 3 veces la superficie útil de la instalación que se requiere climatizar.
- Captación vertical: es el sistema más convencional. Consiste en un intercambiador agua-suelo, con un tubo intercambiador en U en circuito cerrado. Para diseñarlo, es preciso estudiar la demanda de la instalación o proceso industrial frente a la oferta del terreno. Después, se establece el número de perforaciones necesarias para cubrir la demanda. Las perforaciones tienen diámetros pequeños, entre 114 y 152 mm, separadas por 5 a 7 m. El número de sondeos dependerá de la energía necesaria para intercambiar, independiente del recurso hídrico, siendo necesario el estudio de hidrogeología de dicho intercambio energético. En contrapartida a los sistemas horizontales, estos pueden encontrarse en la base de cimentación de la edificación o en un acceso a esta, careciendo de algún servicio. Dichos sistemas no dependen de la climatología y una

vez desarrollados en el balance energético adecuado deben ser sostenibles.

1.5. Sistemas de bomba de calor geotérmica como herramienta de ahorro energético

La bomba de calor geotérmica extrae energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior, mientras que en verano extrae el calor del interior y lo devuelve al subsuelo. Tanto la potencia calorífica o frigorífica de la bomba de calor como la eficiencia energética (COP, *Coefficient of Performance*, razón de la potencia calorífica o frigorífica suministrada por la bomba de calor y su consumo eléctrico) pueden variar según la temperatura de trabajo, independiente de las eficiencias mecánicas y térmicas de los distintos componentes de la máquina. (ATECYR, 2010)

Si se aumenta la temperatura de evaporación, y por lo tanto la presión en el sistema, el compresor tiene que trabajar menos para llegar a la misma presión y temperatura en el condensador y el gasto de electricidad disminuye. En refrigeración se puede ahorrar energía del mismo modo bajando la temperatura del condensador. (ATECYR, 2010)

Cuando la bomba de calor opera en modo calefacción, una buena parte del calor que se utiliza en la aplicación es calor extraído indirectamente del sol que previamente ha sido almacenado por el subsuelo. La parte de calor que proviene del gradiente geotérmico del subsuelo, es decir, del interior de la tierra, es relativamente pequeña o incluso nula. (ATECYR, 2010)

Por tanto, un aumento del COP de la bomba implica automáticamente que se está utilizando una mayor proporción de energía renovable térmica, según la tipología y profundidad del circuito. En este sentido, la capacidad de producción de calor de origen renovable de una bomba de calor es muy grande en comparación con otras

tecnologías, aunque usualmente se requiera para posibilitar tal flujo, de la introducción de una cierta cantidad de energía ya sea eléctrica o térmica. (ATECYR, 2010)

1.6. La geotermia en Guatemala

Los recursos geotérmicos en Guatemala han sido determinados desde la década de 1970, siendo un trabajo en sinergia entre el INDE y la Cooperación Internacional de El Japón (JICA), conocida anteriormente como Agencia de Cooperación Tecnológica con el Extranjero (OTCA, por sus siglas en inglés). (MEM, 2015)

El INDE en conjunto con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en 1982, definió trece áreas con potencial geotérmico. De estas, cinco fueron declaradas áreas de reserva natural, siendo Zunil, Amatitlán, San Marcos, Moyuta y Tecuamburro, localizadas en los departamentos de Quetzaltenango, Guatemala, San Marcos, Jutiapa y Santa Rosa, respectivamente, y fueron concesionadas al INDE para el aprovechamiento racional del recurso geotérmico con fines de generación eléctrica. (MEM, 2016)

La primera planta de energía geotérmica en Guatemala fue instalada en Amatitlán en octubre de 1998 y tenía la capacidad de generar 5 MW. Actualmente, existen dos plantas geotérmicas de producción continua de energía eléctrica a cargo de las empresas Orzunil I de electricidad limitada en el área de Zunil y Ortitlán limitada en el área de Amatitlán ambas con una capacidad de generación de 25,2 MW. (MEM, 2015)

1.7. Legislación en Guatemala

De acuerdo con la Ley general de electricidad, Decreto 93-96, la inversión geotermal debe obtener autorización previa del Ministerio de Energía y Minas. Actualmente, existe una ley que establece incentivos fiscales y económicos para empresas que se dedican a la actividad de proyectos de energía renovable, denominada Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable, Decreto 52-2003, regida según su reglamento en el Acuerdo Gubernativo No. 211-2005.

Posterior a un análisis técnico del proyecto, por parte del Departamento de Energías Renovables –DER- de la Dirección General de Energías –DGE- del MEM, esta ley otorga beneficios fiscales. Actualmente, los proyectos aprobados pueden gozar de los siguientes incentivos:

- Exención de los derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el impuesto del valor agregado –IVA- cargos y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable.
- Exención del pago sobre el impuesto sobre la renta por un periodo de 10 años a partir de la fecha de inicio de operación comercial del proyecto.

2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA OBJETIVO

2.1. Potencial geotérmico en Guatemala

Según el catálogo de recursos geotérmicos de Guatemala, desarrollado por el Departamento de Energías Renovables –DER- de la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, las áreas con potencial geotérmico en la República se muestran en la figura 2. Se considerará como zonas de interés para la implementación de los sistemas de intercambio de calor por energía geotérmica de baja entalpía, únicamente las zonas delimitadas en este mapa.

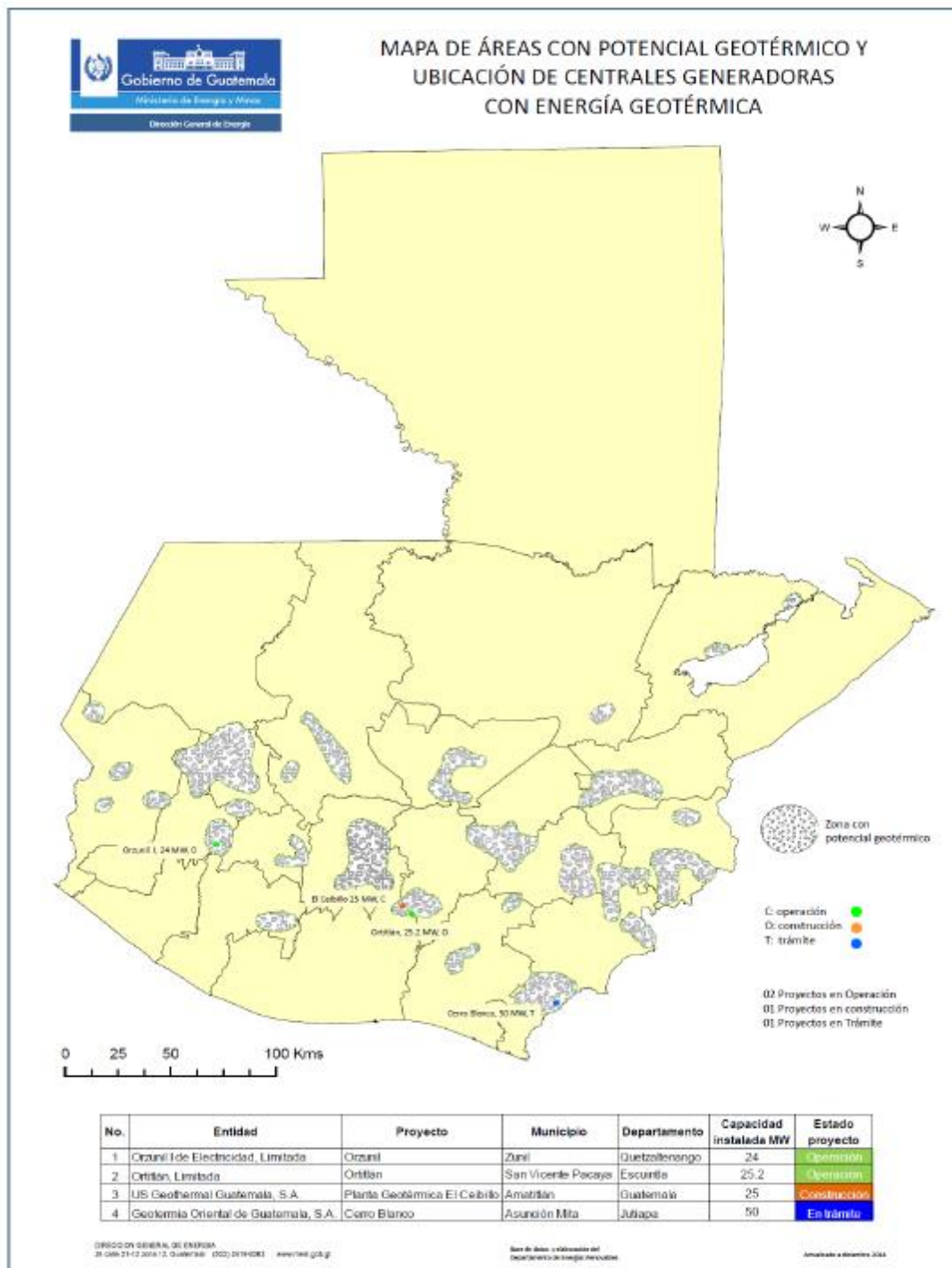
Así, a continuación, se muestra un resumen de las áreas con estudios preliminares, estudios de prefactibilidad y factibilidad, mostradas en el catálogo antes mencionado, siendo estas, por la disposición de la información, las áreas consideradas como objetivo de la investigación:

Tabla I. **Datos técnicos de áreas geotérmicas en la República de Guatemala**

Área geotérmica	Datos técnicos			
	Extensión (km ²)	Potencial estimado (MW)	Intervalo de temperatura (°C)	Profundidad asumida (m)
Totonicapán	128	50	265	No disponible
Moyuta	336	30	114-210	1500-2000
San Marcos	210	24-50	225-255	1800-2000
Tecuamburro	323	50	165-300	2000
Zunil II	35	35	280-320	700-1600
El Ceibillo	100	50	180-225	>1500
Mita	13,306	50	180-240	1500-2500

Fuente: catálogo de recursos geotérmicos de Guatemala, MEM (2015).

Figura 2. **Mapa de áreas con potencial geotérmico en la República de Guatemala**



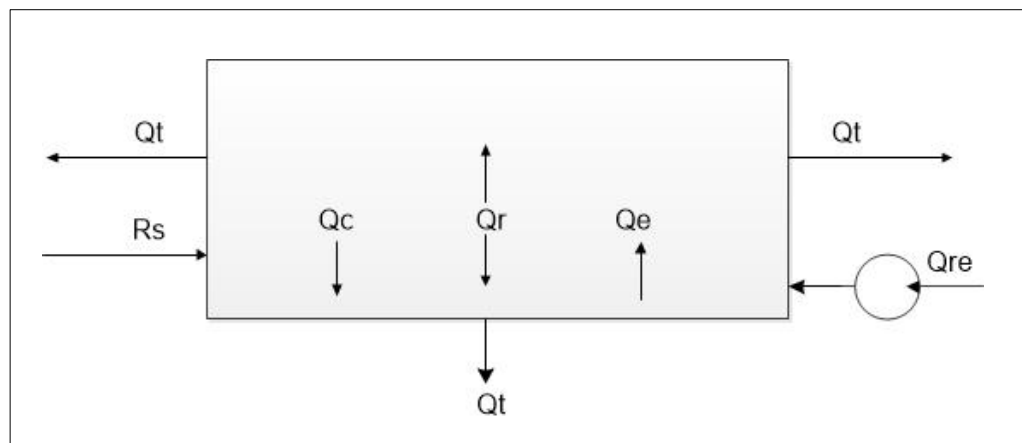
Fuente: catálogo de recursos geotérmicos de Guatemala, MEM (2015).

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

Con el propósito de determinar la demanda energética para la climatización adecuada de la piscina, deben calcularse las necesidades para mantener la temperatura del agua del vaso. Esto se obtiene mediante la estimación de las pérdidas de calor en el agua. En la figura 3, se esquematiza el flujo de estas pérdidas, siendo:

- Evaporación de agua del vaso (Q_e).
- Radiación de calor por diferencias de temperatura (Q_r)
- Convección de calor entre agua y aire (Q_c)
- Renovación del agua del vaso (Q_{re})
- Transmisión de calor del agua al vaso (Q_t)
- Ganancias por radiación solar (R_s)

Figura 3. Esquema del flujo de pérdidas de calor en el vaso



Fuente: elaboración propia.

Estas pérdidas dependerán de los siguientes factores:

- Temperatura ambiente
- Humedad del aire a temperatura ambiente
- Ocupación de la piscina
- Características constructivas del vaso

Se tomará como referencia el área geotérmica de San Marcos, ya que en esta ubicación existe una estación meteorológica del INSIVUMEH. Por lo tanto, los factores climáticos, adjuntos en el anexo, están referenciados a la base de datos histórica de la estación San Marcos, ubicada en la Escuela de Formación Agrícola (EFA), San Marcos, Guatemala.

3.1. Pérdidas por evaporación del agua del vaso

Al evaporarse el agua del vaso, absorbe calor del resto de agua, por lo que disminuye la temperatura de la misma. Cuanto mayor sea la evaporación, mayor será la pérdida de calor. Para este cálculo se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q_e = S(16 + 133n)(W_e - G_a W_{as})C_{vap} ; [W]$$

(Campoamor, s. f.)

Así, con base en las especificaciones técnicas para piscinas olímpicas de la FINA y los datos psicométricos para el área geotérmica de estudio, se calculó esta pérdida.

Tabla II. **Datos para cálculo de la pérdida de calor por evaporación de agua del vaso**

Símbolo	Descripción	Dato
S	Superficie de la piscina en (m ²)	1.250,0
n	Número de nadadores por m ² de superficie de lámina de agua	0,1280
W _e	Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura del agua (kg _{agua} kg _{aire} ⁻¹)	0,0213
G _a	Saturación masiva (%)	0,8610
W _{as}	Humedad absoluta del aire saturado a la temperatura ambiente (kg _{agua} kg _{aire} ⁻¹)	0,0147
C _{vap}	Calor de vaporización del agua para una temperatura de 25 °C en (W kg ⁻¹)	667,80

Fuente: elaboración propia.

3.2. Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación se estimarán a partir de la ecuación de Stefan Boltzmann:

$$Q_r = SD E (T_{ag}^4 - T_c^4) ; [W]$$

Tabla III. **Datos para cálculo de la pérdida de calor por radiación**

Símbolo	Descripción	Dato
S	Superficie de la piscina en (m ²)	1.250,0
D	Constante de Stefan-Boltzmann (W m ⁻² K ⁻⁴)	5,67x10 ⁻⁸
E	Emisividad de la superficie (agua)	0,95
T _{ag}	Temperatura del agua (K)	299,15
T _c	Temperatura superficial de los cerramientos (K)	287,44

Fuente: elaboración propia.

Generalmente, estas pérdidas se consideran despreciables, ya que la temperatura de los cerramientos suele ser, muy pocos grados, menor a la

temperatura ambiente, por lo tanto, la diferencia con la temperatura del agua es mínima.

3.3. Pérdidas por convección

Igual que la pérdida por radiación, es considerada despreciable. Asimismo, casos en los que la temperatura del recinto es superior a la del agua, se obtiene una ganancia en lugar de una pérdida. Para estimar esta pérdida, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_c = 0,6246 S (T_{ag} - T_a)^{4/3} ; [W]$$

(Campoamor, s. f.)

Tabla IV. Datos para cálculo de la pérdida de calor por convección

Símbolo	Descripción	Dato
S	Superficie de la piscina en (m ²)	1.250,0
T _{ag}	Temperatura del agua (°C)	26,0
T _a	Temperatura del aire ambiente (°C)	14,1

Fuente: elaboración propia.

3.4. Pérdidas por renovación de agua

Durante el proceso de mantenimiento y la utilización de la piscina, existen muchas pérdidas de agua, que disminuyen el nivel óptimo, por esto es necesario incorporar agua de renovación en el vaso de la piscina, constantemente. Las pérdidas de calor por renovación suelen ser significativamente grandes, estas dependerán de la temperatura del agua de la red de reabastecimiento y la temperatura del agua de la piscina que se pretende alcanzar. Las mismas se estiman mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{re} = V_r D C_e (T_{ag} - T_x); [W]$$

(Campoamor, s. f.)

Tabla V. **Datos para cálculo de la pérdida de calor por renovación**

Símbolo	Descripción	Dato
V_r	Caudal de agua de renovación ($m^3 s^{-1}$), usualmente 5% del volumen del vaso en un día	0,0014
ρ	Densidad del agua a la temperatura establecida dentro del vaso ($kg m^{-3}$)	996,86
C_e	Calor específico del agua ($J kg^{-1} K$)	4.181,30
T_{ag}	Temperatura del agua (K)	299,15
T_x	Temperatura del agua de la red (K)	279,25

Fuente: elaboración propia.

3.5. Pérdidas por transmisión

Estas pérdidas dependen de las características constructivas del vaso y del coeficiente de transmisión térmica del material empleado. Para la estimación se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_T = C_T S_c (T_{ag} - T_{ex}); [W]$$

(Campoamor, s. f.)

Tabla VI. **Datos para cálculo de la pérdida de calor por transmisión**

Símbolo	Descripción	Dato
C_T	Coeficiente de transmisión de muros ($W m^{-2} ^\circ C$), acabado de azulejo y hormigón	1,50
S_c	Superficie de cerramiento del vaso (m^2)	2.100,0
T_{ag}	Temperatura del agua ($^\circ C$)	26,0
T_{ex}	Temperatura exterior del cerramiento ($^\circ C$)	6,10

Fuente: elaboración propia.

3.6. Ganancias por radiación solar

Estas serán despreciadas, ya que se refieren a ganancias térmicas que redundan su aporte en el mantenimiento de la temperatura del recinto.

4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR INTERCAMBIADOR DE CALOR GEOTÉRMICO

El diseño del sistema de calefacción está basado en los procedimientos establecidos en la guía técnica: “Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica”, del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía – IDAE – del Gobierno de España; tomando como referencia la caracterización de la demanda energética, previamente establecida.

4.1. Fundamentos térmicos del terreno

Con el propósito de determinar los fundamentos térmicos del terreno, es necesario estimar la evolución de la temperatura con la profundidad y las propiedades térmicas del terreno, siendo estas: conductividad, capacidad térmica y difusividad.

4.1.1. Evolución de la temperatura del terreno

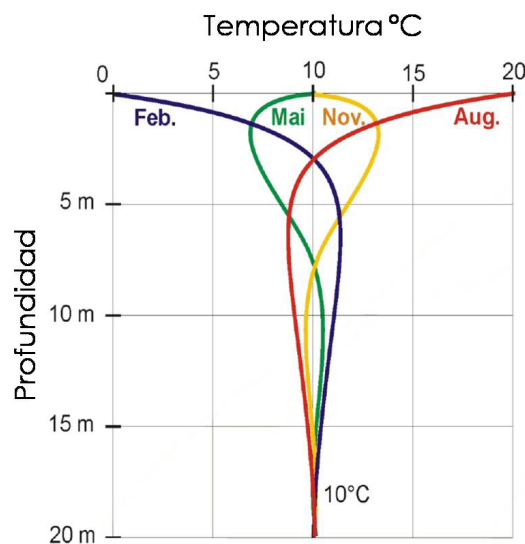
Para determinar la temperatura máxima y mínima del suelo en función del tipo y profundidad del suelo, se utilizan las gráficas de diseño o curvas de embudo.

En la figura 4, se muestra la evolución de la temperatura con la profundidad para diferentes épocas del año. En esta figura se observa que a medida que la profundidad aumenta, la temperatura desciende hasta alcanzar un valor de 10°C. Por lo tanto, a una profundidad de 15 a 20 m, se considera que la temperatura

del terreno permanece constante en el año, con un valor equivalente a la media anual de la superficie, para San Marcos este valor equivale a 14°C.

Sin embargo, en el diseño y dimensionamiento de intercambiadores de calor geotérmicos, para aplicaciones de baja entalpía, el gradiente geotérmico es un factor por considerar únicamente en sistemas verticales con profundidad mayor a 100 m.

Figura 4. **Curva de embudo, evolución de la temperatura del suelo**



Fuente: Energía geotérmica: la energía renovable del suelo; disponible en:
<https://wordpress.com>

4.1.2. **Propiedades térmicas del terreno**

Estos parámetros permiten establecer el aprovechamiento térmico del terreno.

- Conductividad: indica la capacidad para conducir calor de un material, siendo una propiedad característica. Se expresa según la Ley de Fourier como el calor que atraviesa en una dirección x un espesor de 1 m del material como consecuencia de una diferencia de 1 °C entre los extremos opuestos. Se expresa en $W (m^{\circ}C)^{-1}$ o $W (m K)^{-1}$. El valor de conductividad térmica, según el terreno, se tomará de la tabla 4.1: valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales, de la guía técnica antes mencionada; según Paud, D. *Geothermal energy and heat storage*. 2002; por lo tanto, por el tipo de suelo en el área de estudio, arcilloso saturado, el valor de conductividad térmica considerado es de $1,7 W (m K)^{-1}$.
- Capacidad térmica: la capacidad térmica del terreno expresa el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno al incrementarse su temperatura, cuanto mayor sea la capacidad térmica, el calor suministrado deberá ser mayor, para lograr la misma variación de temperatura. Así, de la tabla mencionada en el inciso anterior, para el tipo de suelo del área objetivo, la capacidad térmica promedio es de $2,5 MJ m^{-3} K^{-1}$.
- Difusividad térmica: se define como la razón entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en $m^2 s^{-1}$. El rango de valores de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), oscilan entre $0,36 \times 10^{-6}$ y $0,8 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$, según sea el suelo seco o húmedo. Considerando que el suelo es húmedo, se definirá la difusividad térmica como $0,8 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$.

4.2. Diseño del intercambiador de calor enterrado

Según la caracterización de la demanda energética se establecerá el diseño óptimo del sistema de intercambio de calor enterrado, basado en la teoría de la

fuentes de calor en forma de una línea infinita desarrollada por Ingersoll y Plass, para satisfacer las necesidades de climatización del agua de la piscina.

4.2.1. Elección de la bomba de calor

Las especificaciones de la bomba de calor determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor. Al elegir una bomba de calor para un sistema de intercambio geotérmico es importante considerar el coeficiente de desempeño (COP), que representa la relación entre la capacidad térmica de la bomba y la potencia eléctrica consumida para suministrarla. Para bombas de calor geotérmicas, generalmente, este parámetro es equivalente a 3,5.

Debido a que el diseño propuesto es un sistema de baja entalpía, no se incluirá una bomba de calor, puesto que la energía puede extraerse mediante el bombeo del fluido por el intercambiador de calor enterrado.

4.2.2. Elección del fluido circulante

El fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua.

4.2.3. Elección de la configuración a emplear

Con el propósito de aprovechar el espacio disponible en el perímetro de la piscina, se propone una configuración horizontal *slinky*, con la trayectoria del fluido en serie, esto permitirá que la trayectoria esté perfectamente definida, que el aire atrapado pueda eliminarse con facilidad y que el funcionamiento térmico por metro lineal de tubo sea más alto, ya que requiere de un diámetro mayor, implicando mayor cantidad de fluido circulante.

4.2.4. Elección de los tubos

Se propone tubos de polietileno (PE) por su flexibilidad y resistencia, que permite la unión mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo.

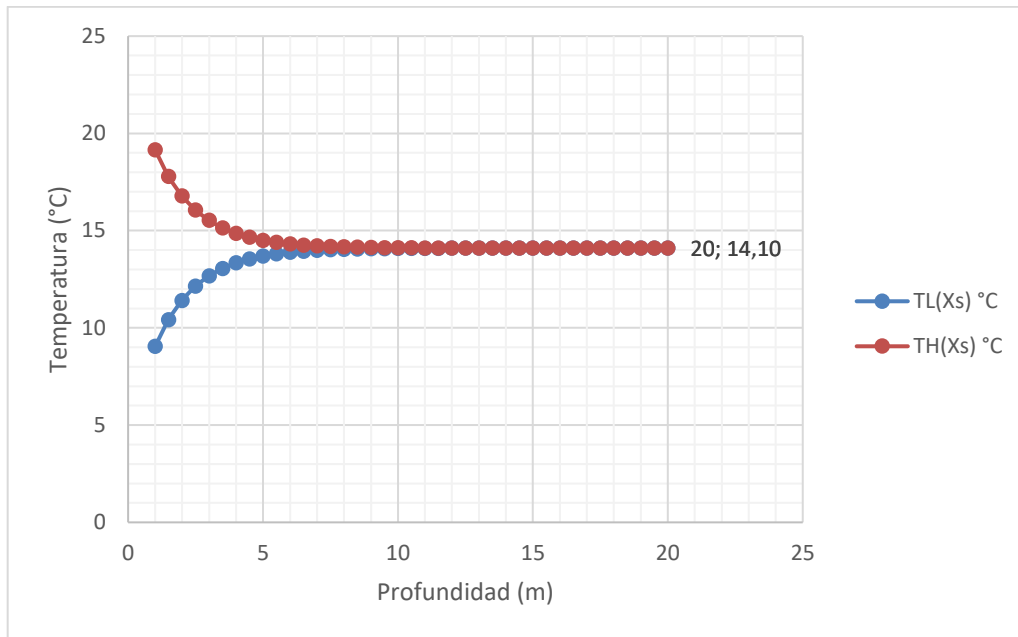
Para asegurar la turbulencia adecuada y las velocidades altas del fluido dentro de la tubería, el número de Reynolds debe ser mayor a 4.000, puesto que cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico. Por lo tanto, según la definición del número de Reynolds, se seleccionará la tubería PE₁₀₀ PN₁₀ con un diámetro nominal de 1 pulgada.

4.2.5. Dimensionamiento del intercambiador de calor

El intercambio de calor está determinado por la diferencia de temperaturas entre el suelo y el fluido que circula por el intercambiador.

- Determinación de la temperatura máxima y mínima de la tierra: a partir de las ecuaciones propuestas en la guía técnica, se calculan las temperaturas mínimas y máximas de la tierra, durante el ciclo anual para cualquier profundidad. En el siguiente gráfico se muestra la variación de la temperatura con la profundidad, para temperaturas máximas (T_H) y mínimas (T_L) de la tierra.

Figura 5. **Variación de las temperaturas máximas y mínimas de la tierra con la profundidad**



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de la resistencia de los tubos al flujo de calor: la resistencia térmica de las tuberías de un intercambiador de calor enterrado se determina, a partir de la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \left(\frac{D_0}{D_1} \right)$$

(Urchueguía et al., 2010)

Así, para la tubería de polietileno seleccionada en el apartado anterior y según los valores establecidos en las especificaciones técnicas de la misma, la resistencia de los tubos al flujo de calor es de $0,0645 \text{ K (W m}^{-1}\text{)}^{-1}$.

- Cálculo de la resistencia de la tierra: la resistencia de la tierra (R_s) es el inverso de la conductividad térmica del terreno, así para el terreno considerado, este valor equivale a $1,6 \text{ K (W m}^{-1})^{-1}$.
- Determinación de la longitud aproximada de la tubería: con el propósito de determinar la longitud aproximada de la tubería del intercambiador de calor, IDAE propone la siguiente ecuación:

$$L = \frac{Q_{\text{calefacción}} \left(\frac{COP - 1}{COP} \right) (R_p + R_s F_{\text{utilización}})}{T_L - T_{\text{mín}}}$$

Tabla VII. **Datos para determinar la longitud aproximada de la tubería**

Símbolo	Descripción	Dato
$Q_{\text{calefacción}}$	Calor de calefacción, demanda térmica (W)	522.983,84
COP	Coeficiente óptimo de desempeño	5
R_p	Resistencia de los tubos al flujo de calor ($\text{K (W m}^{-1})^{-1}$)	0,0645
R_s	Resistencia de la tierra ($\text{K (W m}^{-1})^{-1}$)	1,6
$F_{\text{utilización}}$	Factor de utilización	0,15
$T_{\text{mín}}$	Temperatura mínima del fluido ($^{\circ}\text{C}$)	6,1
T_L	Temperatura mínima de la tierra ($^{\circ}\text{C}$)	14,1

Fuente: elaboración propia.

Para este efecto, según la guía técnica consultada, se asumió el coeficiente óptimo de desempeño y el factor de utilización.

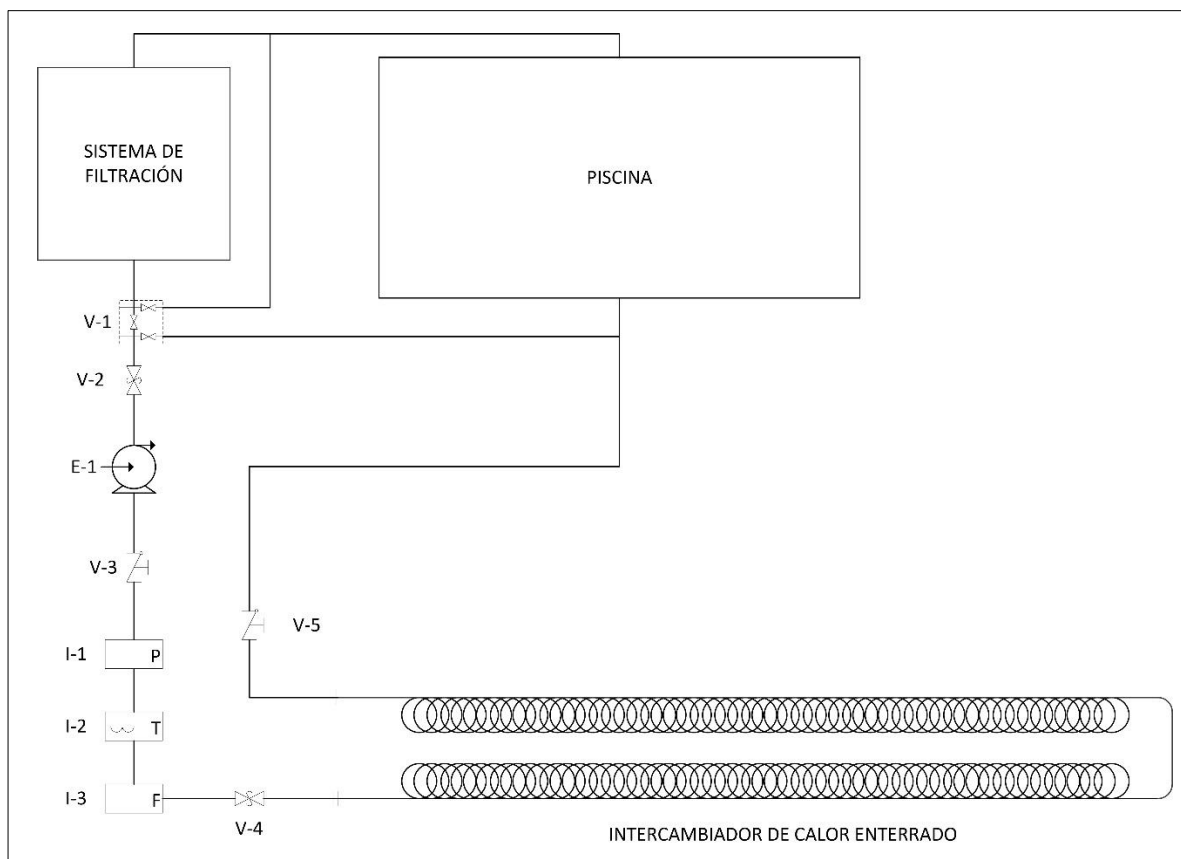
- Elección de la bomba de circulación: con base en el caudal de operación fijado para el intercambiador de calor enterrado, se considera la utilización de una bomba de circulación con las siguientes características.

Tabla VIII. **Especificaciones técnicas de la bomba de circulación**

Tipo	<i>High Head Straight Centrifugal Pump</i>
Potencia (HP)	5
Capacidad máx (GPM)	222
Capacidad (GPM)	98
Capacidad ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0,006
NPSH (m)	250
T máxima ($^{\circ}\text{C}$)	52

Fuente: catálogo de bombas centrífugas *Sta-Rite*, disponible en línea, www.sta-rite.com.

Figura 6. Diagrama de equipo de la instalación para calefacción con base en energía geotérmica



Código	Descripción
V-1	Bypass para el sistema de calefacción
V-2	Válvula de seguridad
V-3	Válvula de retención
V-4	Válvula de seguridad
V-5	Válvula de retención
I-1	Manómetro
I-2	Termómetro
I-3	Medidor de flujo
E-1	Bomba centrífuga

Fuente: elaboración propia.

5. ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se muestra una estimación de los costos brutos para la implementación del sistema de calefacción por un intercambiador enterrado.

Tabla IX. **Estimación de costos**

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Subtotal
Tubería de polietileno de alta densidad hidráulico de 1" de diámetro nominal, RD-13,5 presión de trabajo de 9 kg cm ⁻² , por metro lineal.	15.925	m	Q 6,09	Q 96.983,25
Bomba centrífuga para cabezas altas de succión de 5 HP, marca <i>Sta-Rite</i> , serie D, modelo DHJ.	1	Unidad	Q 8.031,17	Q 8.031,17
Tubería 1 1/2" PVC cédula 40 de alta presión, por metro lineal.	15	m	Q 35,75	Q 536,25
Válvula <i>bypass</i> .	1	Unidad	Q 630,78	Q 630,78
Válvula <i>check</i> de 1 1/2".	2	Unidad	Q 489,00	Q 978,00
Válvula de bola de 1 1/2" de PVC para alta presión.	3	Unidad	Q 234,23	Q 702,69
Medidor de flujo, de 40 a 150 GPM.	1	Unidad	Q 1.368,40	Q 1.368,40
Manómetro de presión.	1	Unidad	Q 312,31	Q 312,31
Termómetro.	1	Unidad	Q 164,00	Q 164,00
Excavación con retroexcavadora, por metro cúbico.	405	m ³	Q 52,00	Q 21.060,00

Fuente: elaboración propia, con base en cotizaciones y precios disponibles en catálogos.

Tabla X. **Estimación de costos (continuación)**

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Subtotal
Relleno controlado para la altura prevista de 2 m, incluye el equipo de compactación (vibro-compactadoras), por metro cúbico.	405	m ³	Q 35,00	Q 14.175,00
Recubrimiento de 0.20 m de suelo controlado (selecto), por metro cúbico.	40,5	m ³	Q 70,00	Q 2.835,00
Instalación de tubería, incluye accesorios y herramientas, por metro lineal.	15.940	m	Q 13,00	Q 207.220,00
Instalación de equipos y líneas de descarga y succión, incluye herramientas y accesorios necesarios para la instalación, por servicio.	1	Unidad	Q 10.000,00	Q 10.000,00
TOTAL				Q 364.996,85

Fuente: elaboración propia, con base en cotizaciones y precios disponibles en catálogos.

6. RESULTADOS

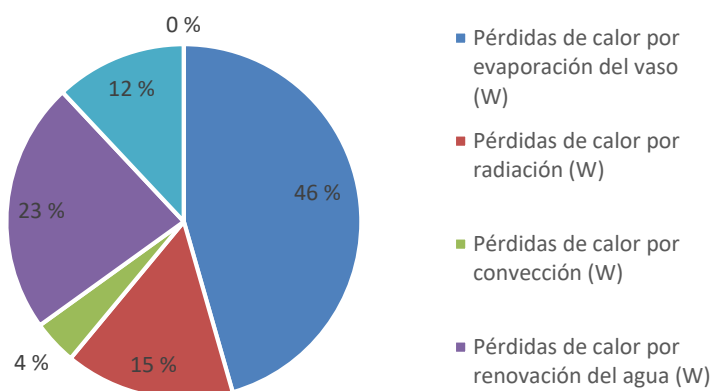
6.1. Caracterización de la potencia requerida para cubrir la demanda energética

Tabla XI. Caracterización según las pérdidas y ganancias de calor

Descripción	Valor (W)
Pérdidas de calor por evaporación del vaso	238.268
Pérdidas de calor por radiación	80.815
Pérdidas de calor por convección	21.212
Pérdidas de calor por renovación del agua	120.004
Pérdidas de calor por transmisión	62.685
Ganancias de calor por radiación solar	0
Demanda energética para calefacción	522.984,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Caracterización de la potencia requerida para cubrir la demanda energética por transferencia de calor (pérdidas y ganancias)



Fuente: elaboración propia.

6.2. Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado

Tabla XII. Especificaciones técnicas del sistema de intercambio de calor de baja entalpía

Descripción	Valor
Material de la tubería	Polietileno (PE ₁₀₀ PN ₁₀)
Diámetro nominal de la tubería	1"
Configuración	<i>Slinky</i> horizontal
Profundidad de perforación	2 m
Longitud de la tubería (ducto flexible)	15.925 m
Diámetro de las espiras	32"
Número de espiras	6.336
Número de secciones	2
Longitud de cada sección	85 m
Separación entre cada sección de tubería	0,3 m
Ancho de la zanja	2,25 m
Longitud de la zanja	90 m

Fuente: elaboración propia.

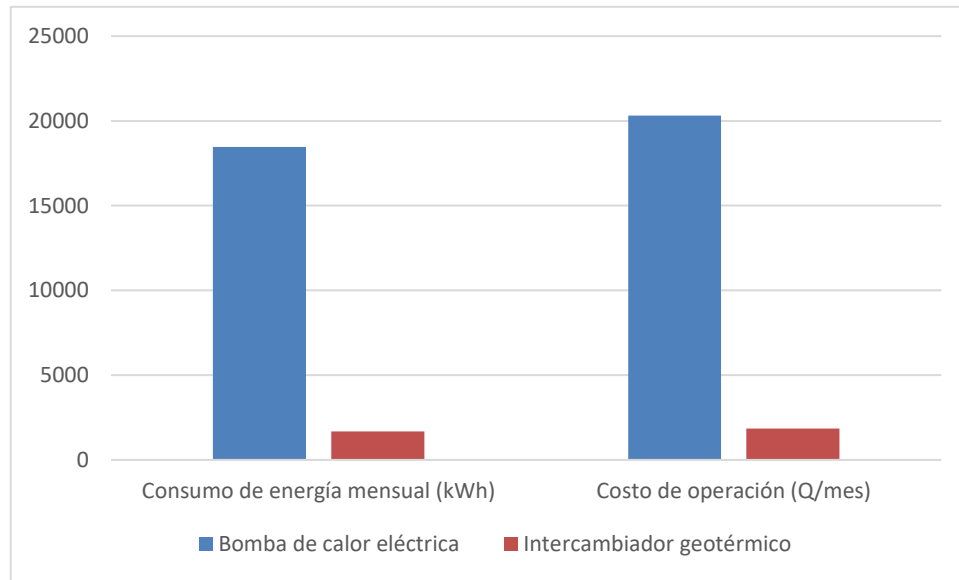
6.3. Análisis económico

Tabla XIII. Comparación económica del sistema de calefacción convencional respecto a la alternativa propuesta

Sistema	Consumo de energía eléctrica (kW)	Tiempo de operación (h día ⁻¹)	Consumo de energía mensual (kWh)	Precio (Q KWh ⁻¹)	Costo de operación (Q mes ⁻¹)
Bomba de calor eléctrica	41,03	15	18.463,5	Q 1,10	Q 20.309,85
Intercambiador geotérmico	3,73	15	1.678,5	Q 1,10	Q 1.846,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Comparación del sistema de calefacción convencional respecto a la alternativa propuesta**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Ahorro energético obtenido mediante la implementación del sistema de calefacción con base en energía geotérmica respecto al uso de bombas de calor eléctricas**

Ahorro energético mensual (kWh)	16.785,00	
Ahorro energético mensual (Q mes^{-1})	Q	18.463,50
Costo del proyecto	Q	364.996,85
Periodo de pago según ahorro (mes)	19,77	

Fuente: elaboración propia.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación de tecnologías eficientes energéticamente es de suma importancia para el desarrollo sostenible, por lo que introducir sistemas de energía alternativa para calefacción es un aporte altamente significativo.

Este estudio 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.

La geotermia de baja entalpía aprovecha el calor que ha sido conservado en el subsuelo por la radiación solar, permitiendo así explotar la energía que se encuentra a profundidades menores y a relativamente bajas temperaturas. Sin embargo, en el estudio se definió el potencial geotérmico en el país, delimitando las siete zonas con esta capacidad. Para ejemplificar la aplicación de la metodología del diseño del intercambiador de calor, se seleccionó el área geotérmica de San Marcos, debido a que en esta zona se encuentra una estación meteorológica del INSIVUMEH que recaba datos históricos respecto a los factores climáticos de la región.

Con el objetivo de definir la necesidad energética a cubrir en una piscina de categoría olímpica, con las dimensiones establecidas por la Federación Internacional de Natación, se realizó un análisis de pérdidas y ganancias de calor. Para este efecto, se utilizó datos de temperaturas promedio y humedades

relativas de la base histórica del INSIVUMEH, de la estación meteorológica de San Marcos.

En la tabla XI, se muestran los resultados de dicho análisis, permite definir que la mayor carga a disipar es la pérdida de calor por evaporación de agua del vaso. Asimismo, una de las mayores pérdidas es ocasionada por el gradiente de temperatura entre el agua del vaso y el agua de renovación, en este caso, mientras menor sea la temperatura del agua de renovación mayor será la pérdida de calor. Por esta razón, esta carga se calculó para la temperatura mínima promedio en el área de estudio, equivalente a 6,1 °C.

Debido a que el calor específico del agua es muy alto, las ganancias de energía fueron despreciadas, ya que se refieren a ganancias térmicas que redundan su aporte en el mantenimiento de la temperatura del recinto.

Una vez establecida la caracterización de la potencia requerida para cubrir la demanda energética, se definieron los fundamentos térmicos del terreno, estos considerando un tipo de suelo arcilloso. El primer parámetro considerado es la evolución de la temperatura con la profundidad, este permite establecer la profundidad a la que estará enterrado el intercambiador de calor para cubrir las necesidades de transferencia. Así, para el caso de estudio, la temperatura del terreno se consideró equivalente a la temperatura media anual de la superficie, con un valor de 14 °C.

Posteriormente, se definieron las propiedades térmicas del terreno, las mismas se calcularon a partir de definiciones teóricas y valores establecidos en tablas. Estas se utilizaron para determinar la longitud de la tubería en el dimensionamiento del intercambiador.

Para el diseño del intercambiador de calor enterrado se seleccionó tubería de polietileno de alta densidad, esto debido a su flexibilidad y resistencia térmica. El diámetro de la tubería se estableció a partir de las especificaciones de la bomba de circulación, asegurando que el flujo permanezca turbulento en el recorrido, para aumentar el coeficiente de transferencia de calor.

En la tabla XII, se muestran las especificaciones técnicas para el diseño del intercambiador de calor enterrado. La longitud óptima de la tubería de intercambio se determinó, según la metodología propuesta por el IDAE, esta sigue el método de la IGSHPA (*Internacional Ground Source Heat Pump Association*) que está basado en la teoría de la fuente de calor en forma de línea infinita desarrollada por Ingersoll y Plass. Este método, por ser un cálculo estático, asume que la carga del sistema es constante por un tiempo determinado, por lo que se consideró la temperatura más desfavorable, siendo esta la temperatura mínima media anual. Así, en condiciones normales la eficiencia del sistema será mayor, funcionando con un mejor rendimiento.

Es una opción más económica realizar una perforación horizontal en lugar de una vertical, por lo tanto, se estableció esta configuración como óptima. Así, con el propósito de aprovechar el espacio disponible se propone una configuración *slinky* en una zanja horizontal, conformada por dos secciones de 80 m cada una. Esta, como se muestra en el plano anexo, aprovechará el espacio a lo largo del vaso de la piscina, optimizando el área a utilizar. La configuración *slinky* es una variante de la horizontal que dispone la tubería formando espiras, esto se emplea para instalar la mayor longitud de tubería con la menor excavación posible.

Actualmente, la mejor tecnología con base en energía convencional para sistemas de climatización de agua es la bomba de calor eléctrica, por lo que se

realizó una comparación del consumo de energía de este sistema respecto al propuesto, para definir el ahorro energético.

Para climatizar una piscina con las características establecidas, es necesario implementar un sistema de calefacción con una bomba de calor de $140.000 \text{ BTU h}^{-1}$, 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.

Los sistemas de calefacción funcionarán durante 15 horas, tiempo que generalmente permanece en uso una piscina, considerando que la misma necesita un período de mantenimiento para el tratamiento químico del agua. Así, realizando el cálculo del consumo de energía mensual, se obtuvo que el ahorro energético al implementar el sistema propuesto equivale a 16.785,00 kWh al mes, esto se traduce a un ahorro de Q18.463,50 al mes, permitiendo pagar la inversión del sistema de calefacción por un intercambiador de calor enterrado en un periodo aproximado de 20 meses, demostrando así la viabilidad, tanto técnica como económica del proyecto.

CONCLUSIONES

1. El sistema de calefacción con un intercambiador de calor geotérmico de baja entalpía, que permite la conservación de la temperatura en el agua de una piscina de categoría olímpica y mejora la eficiencia del sistema de transferencia de calor, está conformado por 15.925,00 m de tubería de polietileno de 1 pulgada en configuración horizontal *slinky*.
2. El diseño propuesto del 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 de categoría olímpica, aumentando así la eficiencia energética.
3. El consumo energético del sistema de calefacción de una piscina de categoría olímpica necesario para conservar la temperatura en el agua entre 24 y 28 °C es de 522,984 kW, siendo la mayor pérdida de energía en el sistema ocasionada por la evaporación del agua del vaso de la piscina.
4. El ahorro energético por obtener si se implementa el sistema de calefacción con base en energía geotérmica equivale a 16.785,00 kWh al mes, esto se traduce a Q18.463,50 mensuales, siendo una alternativa viable técnica y económicamente.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el sistema de calefacción, por medio de un intercambiador de calor enterrado que utilice energía geotérmica de baja entalpía como alternativa a los sistemas de energía convencional para la climatización de piscinas.
2. Utilizar la metodología descrita en el estudio, para el diseño de sistemas de calefacción de agua para climatización.
3. Aprovechar el potencial energético de baja entalpía, para adecuación de la temperatura del agua de proceso en industrias de manufactura.
4. Implementar medidores de humedad del suelo en el sistema y evaluar el efecto de la humedad en el proceso de transferencia de calor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arata, B. & Cristóbal, A. (2014) *Mediciones en condiciones de operación del sistema de aprovechamiento geotérmico de baja entalpía del edificio Beauchef 851*. (Tesis de maestría, Universidad de Chile). Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115965>.
2. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2010) *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Recuperado de <http://publireportajes.lavanguardia.es/idae/pdf/Guia-Tecnica-IDAE.Diseno-de-sistemas-de-bomba-de-calor-geotermica.pdf>.
3. Bastos, S. & Uhía, F. *Tecnología inverter en bombas de calor geotérmicas*. Ecoforest Geotermia. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5077897.pdf>.
4. Campoamor, G. (s.f.) *Proyecto de climatización de una piscina semiolímpica cubierta*. Departamento de Ingeniería Térmica, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/7551/1/pfc-gersoncampoamor.pdf.
5. Federación Internacional de Natación. (2013). *Reglamento de Instalaciones*. Recuperado de

[http://www.rfen.es/publicacion/userfiles/Reglamento%20Tecnico%20Natacion%202013-2017\(1\).pdf](http://www.rfen.es/publicacion/userfiles/Reglamento%20Tecnico%20Natacion%202013-2017(1).pdf).

6. García Gutiérrez, A, Barragán, R. & Arellano, V. (2008). *Investigación y desarrollo tecnológico sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica*. Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana y en Geotermia *Revista Mexicana de Geoenergía*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/239527325_Investigacion_y_desarrollo_tecnologico_sobre_bombas_de_calor_en_Mexico_operando_con_energia_geotermica.
7. *Geothermal Heat Pumps. Introductory Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Electric Power Research Institute, Oklahoma State University, International Ground Source Heat Pump Association.
8. Jiménez, J. (2009) *Comparativa de eficiencia energética y amortización en el edificio de Can Marcet de Sabadell entre distintas instalaciones de energías renovables*. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/7221>.
9. López, C. *El subsuelo como fuente de energía. Instalaciones geotérmicas*. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Recuperado de http://aetess.com/wp-content/uploads/Carlos_Lopez_Jimeno_GEOTERMIA.pdf.

10. Magraner, T. (2010) *Validación experimental de los métodos de diseño de instalaciones de bomba de calor acoplada al terreno*. (Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8682/tesisUPV3355.pdf>.
11. Ministerio de Energía y Minas. (2015) *Recursos geotérmicos de Guatemala*. Recuperado de: <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Catalogo-final...versi%C3%B3n-DER-12032015.pdf>.
12. Moratilla, B., Álvarez, I., Amores, A., García, T., De Isabel, J., López, R., López, S., Méndez, A., De Miguel, C., Ramos, G., Royo, P., Sáenz, J., Sánchez, J. & Vicuña, J. (2004). *Usos del agua en las nuevas tecnologías energéticas: hidrocarburos no convencionales y geotermia*. Colección: Avances de Ingeniería, Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas. Recuperado de <https://www.icaei.es/privatesocios/publicaciones/usodelagua.pdf>.
13. Noguera Sebastián, J. (2011). *Climatización de una piscina cubierta mediante la combinación de energía solar térmica, geotermia y caldera de apoyo de biomasa*. (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12795/Memoria.pdf>.
14. Schoennenbeck, P. (2014) *Bombas de calor Geotérmicas. Diseño de intercambiadores de calor verticales enterrados*. (Tesis de maestría,

Universidad Politécnica de Catalunya). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23032>

15. 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*. (Tesis especialización en geología, Universidad de Chile). Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/111538/cf-seisdedos_ms.pdf?sequence=1.
16. Toledo, M., Moffat, R., Herrera, P., Guggisberg, G. & Muñoz, M. *Implementación de un aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en el sistema de entibación del nuevo edificio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Recuperado de http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14127_pp_492_494.pdf.
17. Urchueguía, J., Zacarés, M., Jiménez, J. & Corberán, J. *Comparative energy performance between a geothermal heat pump system and an air-to-water heat pump system for heating and cooling typical conditions of the European Mediterranean Coast*. Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/12A-4.pdf.

ANEXOS

Tabla I. **Temperaturas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos**

Datos mensuales y anuales de temperatura promedio (°C)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1990	12,5	11,5	12,3	13,3	13,7	15,1	14,6	14,9	13,6	12,3	12,9	12,9	13,3
1991	11,9	12,9	12,1	14,4	15,0	14,7	14,8	13,7	14,6	12,5	13,6	12,0	13,5
1992	11,5	11,7	13,9	15,7	15,4	15,3	15,0	14,0	---	14,2	13,2	12,8	13,9
1993	11,5	11,6	12,8	14,0	14,7	14,5	14,7	13,9	13,9	13,8	13,9	12,5	13,5
1994	11,7	11,7	13,9	14,3	14,9	14,3	15,3	14,4	14,7	14,2	14,2	13,1	13,9
1995	12,2	13,3	13,5	14,6	14,7	14,9	14,8	14,3	14,0	13,8	13,7	12,8	13,9
1996	11,9	11,7	12,4	14,0	14,4	14,4	14,5	14,6	14,1	13,9	---	13,4	13,6
1997	12,0	13,0	13,0	14,2	14,7	13,9	15,2	15,3	---	14,0	14,5	13,3	13,9
1998	13,5	13,1	15,1	15,2	15,2	14,2	14,3	14,3	13,0	14,6	13,8	---	14,2
1999	12,4	11,6	13,2	14,2	14,5	14,4	14,9	15,0	14,1	14,4	13,8	---	13,9
2000	12,1	11,3	12,4	13,3	13,3	14,7	15,2	---	14,4	13,8	13,7	13,4	13,4
2001	13,3	14,6	14,3	14,6	15,3	---	15,2	15,8	13,8	15,1	13,5	13,3	14,5
2002	13,3	14,1	15,7	16,7	14,4	14,6	15,4	---	14,4	14,0	14,2	10,4	14,3
2003	12,7	12,9	14,8	15,5	14,8	14,1	15,5	15,3	14,9	15,2	15,8	---	14,7
2004	---	---	---	---	---	---	---	---	14,6	15,2	15,9	---	15,2
2005	15,2	14,5	15,1	15,7	15,4	15,0	14,8	15,2	14,8	14,9	14,7	14,7	15,0
2006	14,0	--	--	14,0	14,4	14,3	15,0	15,0	14,6	14,7	14,2	14,4	14,5
2007	14,4	14,6	14,8	14,8	15,1	14,7	14,7	14,4	14,1	13,9	14,6	13,5	14,5
2008	13,3	13,3	13,6	14,6	15,0	14,0	14,3	14,1	14,3	14,6	14,4	14,4	14,2
2009	13,5	13,8	14,1	14,3	14,1	14,5	15,0	15,3	15,0	15,1	13,7	---	14,4
2010	13,8	14,6	16,0	15,1	15,4	---	14,5	14,3	14,3	14,8	13,2	12,5	14,4
TEMPERATURA ANUAL PROMEDIO (°C)													14,1

Fuente: Estación meteorológica San Marcos, Escuela de Formación Agrícola (EFA),
INSIVUMEH.

Tabla II. **Temperaturas máximas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos**

Datos mensuales y anuales promedio de temperatura máxima (°C)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1990	20,6	20,4	21,1	21,2	20,5	20,5	20,4	20,9	20,7	20,3	20,5	20,4	20,6
1991	20,6	22,0	22,1	21,4	20,7	20,6	21,2	21,2	20,3	19,5	20,2	20,3	20,8
1992	20,6	19,8	21,0	22,0	20,9	20,3	20,0	20,2	19,8	19,7	20,0	20,3	20,4
1993	19,5	20,6	20,0	20,6	20,4	19,3	20,1	20,3	20,0	20,3	20,7	20,0	20,2
1994	20,2	20,0	21,8	21,1	21,1	20,0	20,9	20,4	20,2	20,0	20,7	20,3	20,6
1995	20,1	21,4	20,8	21,1	20,4	20,4	20,7	19,9	19,6	19,1	20,6	20,2	20,4
1996	19,9	20,5	20,0	19,6	19,2	19,8	20,0	20,1	20,3	20,0	---	20,7	20,0
1997	20,0	20,1	20,5	20,7	21,0	19,2	21,4	21,8	---	19,8	20,9	20,4	20,5
1998	21,1	21,4	23,1	22,3	23,0	21,7	20,4	20,3	20,0	19,5	18,6	---	21,0
1999	19,5	18,1	20,9	21,3	20,9	18,7	19,9	20,4	19,4	19,5	19,5	---	19,8
2000	20,4	17,8	20,5	20,6	20,1	20,0	21,3	---	20,0	19,1	19,8	20,0	20,0
2001	20,6	20,1	20,1	20,1	20,5	---	20,9	21,1	18,7	20,3	18,8	20,7	20,2
2002	19,5	20,4	20,2	23,2	20,5	19,2	20,6	---	18,7	20,0	20,3	20,4	20,3
2003	20,0	20,5	20,7	21,4	20,0	18,4	20,2	20,3	20,3	20,0	20,5	---	20,2
2004	---	---	---	---	---	---	---	---	21,5	21,5	21,8	---	21,6
2005	21,7	20,6	21,5	21,4	21,2	21,2	21,2	21,0	21,1	21,1	20,3	21,1	21,1
2006	20,4	---	---	20,0	20,2	18,6	19,8	20,4	20,5	20,6	19,7	20,1	20,0
2007	20,8	20,7	20,9	20,8	20,0	20,0	19,9	20,7	20,0	19,7	20,2	19,9	20,3
2008	20,3	20,0	20,3	20,7	20,6	20,1	20,4	20,3	20,3	20,6	20,2	20,6	20,4
2009	21,0	20,0	20,3	20,7	20,2	19,6	20,6	20,5	20,0	20,4	20,4	---	20,3
2010	20,3	20,5	21,0	20,6	19,9	---	19,8	19,7	18,6	19,2	18,9	18,5	19,7
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL PROMEDIO (°C)													20,4

Fuente: Estación meteorológica San Marcos, Escuela de Formación Agrícola (EFA),
INSIVUMEH.

Tabla III. **Temperaturas mínimas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos**

Datos mensuales y anuales promedio de temperatura mínima (°C)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1990	3,6	3,3	4,0	6,5	8,4	9,7	7,6	8,1	8,6	6,4	5,8	3,3	6,3
1991	1,7	1,5	2,5	5,9	8,5	9,1	7,7	7,8	8,0	6,7	5,8	5,1	5,9
1992	2,0	1,3	2,5	6,9	7,0	9,1	7,8	7,8	7,7	6,5	5,1	4,2	5,7
1993	1,9	1,3	4,7	6,1	8,1	8,9	7,9	7,5	7,4	6,9	4,4	3,0	5,7
1994	2,5	1,6	2,9	4,5	8,2	7,9	6,6	6,6	7,1	5,9	5,3	4,5	5,3
1995	2,7	2,6	3,2	6,8	8,0	8,6	8,5	9,2	9,2	7,3	4,5	3,6	6,2
1996	1,4	0,9	2,5	7,3	8,9	9,3	8,6	7,8	7,7	7,4	---	2,9	5,9
1997	2,1	4,7	4,2	6,2	8,0	8,0	8,4	8,4	---	7,2	7,2	3,0	6,1
1998	3,6	3,4	3,5	7,0	5,1	7,8	8,0	8,6	9,0	4,5	4,8	---	5,9
1999	2,9	2,1	2,5	5,4	7,8	8,5	8,1	6,9	8,4	6,0	2,6	---	5,6
2000	2,0	2,0	3,0	6,4	11,0	6,7	7,0	---	7,0	7,3	4,8	2,9	2,6
2001	3,8	8,2	4,3	6,6	7,2	---	7,9	8,9	7,4	8,0	3,5	3,2	4,8
2002	2,3	5,8	3,4	5,4	8,2	9,0	9,9	---	9,5	8,7	7,6	6,4	6,9
2003	4,1	3,7	7,5	8,1	9,3	10,0	8,1	7,9	8,6	8,5	8,0	---	7,6
2004	---	---	---	---	---	---	10,0	8,6	6,4	8,5	4,6	7,6	7,6
2005	4,6	7,4	4,2	7,6	8,0	8,9	7,4	5,6	5,2	4,5	4,3	4,0	6,0
2006	2,6	---	---	6,0	9,1	9,3	8,2	8,1	8,1	8,3	6,0	5,9	7,2
2007	4,7	4,6	5,9	7,7	8,6	8,9	8,3	8,7	8,0	8,2	6,1	12,2	7,7
2008	3,4	5,3	6,8	8,3	8,9	9,0	8,2	6,7	8,5	7,7	3,9	2,8	6,6
2009	2,1	2,8	3,1	5,7	8,2	8,2	7,6	8,7	8,0	7,3	5,9	---	6,1
2010	2,8	6,3	8,0	8,1	9,3	---	---	9,7	9,3	7,8	5,4	2,9	7,0
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL PROMEDIO (°C)													6,1

Fuente: Estación meteorológica San Marcos, Escuela de Formación Agrícola (EFA),
INSIVUMEH.

Tabla IV. **Humedades relativas promedio anuales y mensuales, para la estación meteorológica San Marcos**

Promedio mensuales y anuales de humedad relativa en porcentaje (%)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1990	75,0	79,0	77,0	83,0	90,0	87,0	86,0	---	90,0	90,0	81,0	82,0	84,0
1991	83,0	83,0	87,0	88,0	91,0	86,0	84,0	93,0	94,0	88,0	90,0	78,0	87,0
1992	81,0	89,0	89,0	88,0	92,0	96,0	91,0	84,0	93,0	88,0	88,0	80,0	88,0
1993	82,0	79,0	84,0	84,0	89,0	89,0	84,0	84,0	91,0	89,0	83,0	82,0	85,0
1994	81,0	81,0	81,0	83,0	88,0	86,0	83,0	85,0	84,0	88,0	85,0	81,0	84,0
1995	80,0	76,0	80,0	95,0	89,0	90,0	88,0	91,0	94,0	91,0	87,0	85,0	87,0
1996	79,0	80,0	86,0	88,0	91,0	87,0	90,0	87,0	88,0	89,0	---	86,0	86,0
2003	84,0	80,0	---	86,0	90,0	88,0	88,0	89,0	90,0	86,0	87,0	----	87,0
2005	---	84,0	80,0	---	86,0	90,0	88,0	88,0	89,0	90,0	86,0	87,0	87,0
2006	90,0	---	---	88,0	93,0	94,0	93,0	92,0	92,0	92,0	88,0	88,0	91,0
2007	89,0	87,0	84,0	56,0	87,0	88,0	87,0	88,0	89,0	88,0	89,0	86,0	85,0
2008	87,0	84,0	87,0	87,0	88,0	87,0	88,0	88,0	88,0	88,0	87,0	87,0	87,0
2009	85,0	80,0	79,0	79,0	87,0	86,0	83,0	84,0	87,0	85,0	85,0	---	84,0
2010	81,0	80,0	79,0	85,0	87,0	---	85,0	86,0	88,0	83,0	81,0	85,0	84,0
Humedad relativa anual promedio (%)													86,1

Fuente: Estación meteorológica San Marcos, Escuela de Formación Agrícola (EFA),
INSIVUMEH.

Tabla V. **Humedad absoluta del aire saturado a distintas temperaturas**

T (°C)	HA (kg _{agua} kg _{aire} ⁻¹)
20	0,0147
21	0,0155
22	0,0165
23	0,0177
24	0,0187
25	0,0200
26	0,0213
27	0,0225
28	0,0240
29	0,0255
30	0,0270

Fuente: carta psicrométrica de la serie VALCON.

Tabla VI. **Especificaciones de la Federación Internacional de Natación, para una piscina olímpica**

Largo (m)	50
Ancho (m)	25
Número de carriles	10
Ancho del carril (m)	2,5
Temperatura del agua (°C)	24-28
Intensidad de luz (lux)	>1.500
Profundidad mínima (m)	2,0

Fuente: Federación Internacional de Natación (FINA).

Tabla VII. Temperatura máxima y mínima de la tierra en función de la profundidad, para el área de estudio

Profundidad (m)	TL(Xs) °C	TH(Xs) °C
1	9,05	19,15
1,5	10,41	17,79
2	11,41	16,79
2,5	12,14	16,06
3	12,67	15,53
3,5	13,06	15,14
4	13,34	14,86
4,5	13,55	14,65
5	13,70	14,50
5,5	13,80	14,40
6	13,88	14,32
6,5	13,94	14,26
7	13,99	14,21
7,5	14,02	14,18
8	14,04	14,16
8,5	14,06	14,14
9	14,07	14,13
9,5	14,08	14,12
10	14,08	14,12
10,5	14,09	14,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Temperatura máxima y mínima de la tierra en función de la profundidad, para el área de estudio (continuación)

Profundidad (m)	TL(Xs) °C	TH(Xs) °C
11	14,09	14,11
11,5	14,09	14,11
12	14,10	14,10
12,5	14,10	14,10
13	14,10	14,10
13,5	14,10	14,10
14	14,10	14,10
14,5	14,10	14,10
15	14,10	14,10
15,5	14,10	14,10
16	14,10	14,10
16,5	14,10	14,10
17	14,10	14,10
17,5	14,10	14,10
18	14,10	14,10
18,5	14,10	14,10
19	14,10	14,10
19,5	14,10	14,10
20	14,10	14,10

Fuente: elaboración propia.