

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE:**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**

**INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CALENTAMIENTO DE AGUA POR TUBOS DE VACÍO CON ENERGÍA  
SOLAR TÉRMICA PARA LA PISCINA DE 360 m<sup>3</sup> DEL CLUB CASTILLO  
DE AMAGUAÑA**

**AUTORES:**

**ALEX PATRICIO CARVAJAL PAUCAR**

**RUBÉN DARIO MEJÍA ALMEIDA**

**TUTOR:**

**LUIS FERNADO TOAPANTA RAMOS**

**Quito, marzo del 2021**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

Nosotros, Alex Patricio Carvajal Paucar y Rubén Dario Mejía Almeida, con documentos de identidad N° 1719991414 y N° 1716281553, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que somos autores del Trabajo de Titulación intitulado DISEÑO Y ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR TUBOS DE VACÍO CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA LA PISCINA DE 360 m<sup>3</sup> DEL CLUB CASTILLO DE AMAGUAÑA, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

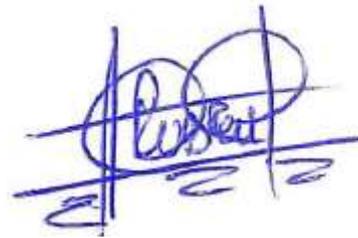
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, marzo del 2021



---

Alex Patricio Carvajal Paucar  
C.I. 1719991414



---

Rubén Dario Mejía Almeida  
C.I. 1716281553

## DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación, DISEÑO Y ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR TUBOS DE VACÍO CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA LA PISCINA DE 360 m<sup>3</sup> DEL CLUB CASTILLO DE AMAGUAÑA, realizado por Alex Patricio Carvajal Paucar y Rubén Darío Mejía Almeida, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021



---

Luis Fernando Toapanta Ramos  
C.I. 1721113759

## **DEDICATORIA**

A mi madre, Doris por confiar en mí y apoyarme siempre a pesar de las adversidades de la vida... El sacrificio que haces todos los días, hoy se ve reflejado en los triunfos de tus hijos.

A mis abuelitos José Manuel y María Luisa, sin duda alguna ustedes son los motores de mi existencia y la razón de mi superación constante, inculcaron en mí desde niño el trabajo honesto, la responsabilidad y la lucha constante para alcanzar mis objetivos.

A mi hermano Javier, compañero de aventuras extremas... Gracias por tu apoyo incondicional en cualquier locura y proyecto que se me ocurre.

A mi novia Carina, por brindarme su cariño y alentarme durante toda mi carrera, hemos completado una meta más como pareja.

Dedico el presente trabajo al personal administrativo, de servicios y mantenimiento de la empresa Club Castillo de Amaguaña, que durante mi trayectoria de 7 años como un colaborador más han sido partícipes de los logros alcanzados durante mi vida universitaria y laboral.

*Alex Carvajal*

Dedico este trabajo a mis padres, María Elena y Rubén, quienes con sus consejos, amor, paciencia y esfuerzo me han ayudado a cumplir hoy una meta más.

A mi esposa Tatiana por ser el apoyo incondicional en mi vida, que con su amor, confianza y respaldo me alienta en todo momento, estimula mi deseo de superación y me impulsa a cumplir todos mis objetivos.

A mis queridos hijos, Israel y Juan Pablo que son lo más importante en mi vida y el motor de la misma, su amor y cariño me motivan a mejorar día a día como persona y como profesional, espero que un día comprendan que les debo lo que soy ahora y que este logro sirva de herramienta para guiar cada uno de sus pasos.

Por último, a mi hermano Irvin, que sin duda alguna fue mi inspiración para dedicar mi vida a la Ingeniería Mecánica, siempre ha estado junto a mí para brindarme su ayuda, lo admiro mucho y me alegra que muy pronto los dos podremos ser colegas de la misma profesión.

***Rubén Mejía***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por permitirnos crecer académicamente y ser parte de los profesionales graduados de esta excelente institución. A nuestro profesor y tutor Ingeniero Fernando Toapanta Ramos, M.Sc. PhD. (c) quien con sus conocimientos y amplia experiencia nos guio a través de cada una de las etapas propuestas en este trabajo de titulación para lograr alcanzar nuestra meta. A la carrera de Ingeniería Mecánica y su planta docente que hicieron de nuestro paso por las aulas momentos únicos, agradables y llenos de conocimiento.

Le damos un agradecimiento especial a la empresa Club Castillo de Amaguaña y personal administrativo quienes nos colaboraron con la apertura de sus instalaciones y la viabilidad para el estudio, diseño y análisis de la implementación de nuestro proyecto. Al equipo de mantenimiento de piscinas por la disponibilidad y predisposición que tuvieron al brindarnos su ayuda y compartir su conocimiento durante el avance de este proyecto.

A todos ustedes, muchas gracias... ¡Sin su apoyo esto no hubiese sido posible!

*Alex Carvajal & Rubén Mejía*

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES .....	I
DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE.....	VI
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
CAPÍTULO I.....	1
ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Estado del arte .....	1
1.2 Aspectos teóricos.....	4
1.2.1 Energías renovables .....	4
1.2.2 Energía solar .....	5
1.2.3 Insolación.....	7
1.2.4 Aprovechamiento de la energía solar.....	8
1.2.4.1 Aprovechamiento pasivo.....	8
1.2.4.2 Aprovechamiento activo .....	9
1.2.4.3 Conversión fotovoltaica.....	9
1.2.4.4 Conversión térmica.....	10
1.2.5 Calor solar para procesos industriales (SHIP).....	11
1.2.6 Energía solar en el Ecuador .....	11
1.2.7 Club Castillo de Amaguaña .....	13
1.2.8 Sistemas que utilizan energía solar para calentar piscinas .....	14
1.2.9 Los colectores solares con y sin concentración de imagen.....	15
1.2.10 Colector solar térmico.....	15
1.2.11 Colector solar de placa plana .....	17
1.2.12 Colector parabólico compuesto .....	18
1.2.13 Colector con tubos de vacío o evacuados .....	19
1.2.13.1 Colector de tubo de vacío water-in-glass .....	20
1.2.13.2 Colector solar tipo U .....	21
1.2.13.3 Colector de tubos de vacío con heat pipe .....	21
1.3 Conclusiones del capítulo.....	23

CAPÍTULO II.....	24
ESTUDIOS PREVIOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR TUBOS DE VACÍO .....	24
2.1 Cálculo de los ángulos solares.....	24
2.1.1 Declinación solar .....	24
2.1.2 Ángulo horario.....	26
2.1.3 Ángulo de altitud solar.....	27
2.1.4 Ángulo zenit solar.....	27
2.1.5 Ángulo azimut solar.....	28
2.1.6 Número de horas luz del día o longitud del día .....	28
2.2 Radiación solar .....	29
2.3 Radiación diaria sobre una superficie horizontal .....	30
2.4 Media mensual de irradiación total diaria en superficies con inclinación...	32
2.5 Análisis termodinámico del colector con tubos de vacío .....	34
2.6 Balance de energía en la piscina.....	37
2.6.1 Energía que entra a la piscina .....	38
2.6.2 Energía que abandona la piscina.....	39
2.6.3 Pérdidas generadas por convección .....	40
2.6.4 Pérdidas por evaporación.....	42
2.6.5 Pérdidas por conducción.....	46
2.6.6 Pérdidas por renovación.....	48
2.6.7 Pérdidas por radiación .....	48
2.7 Conclusiones del capítulo.....	49
CAPÍTULO III .....	50
RADIACIÓN SOLAR APORTADA Y DEMANDA ENERGÉTICA DE LA PISCINA.....	50
3.1 Cálculo de los ángulos solares.....	50
3.1.1 Estimación de la radiación sobre una superficie horizontal. ....	52
3.1.2 Estimación de la radiación sobre una superficie inclinada.....	55
3.2 Cálculo del balance energético.....	58
3.2.1 Cálculo de la energía que ingresa .....	59
3.2.2 Cálculo de pérdidas por convección .....	59
3.2.3 Cálculo de pérdidas por evaporación.....	61
3.2.4 Cálculo de pérdidas por conducción.....	66
3.2.5 Cálculo de pérdidas por renovación.....	67

3.2.6	Cálculo de pérdidas por radiación .....	67
3.2.7	Cálculo de pérdidas totales del sistema .....	67
3.2.8	Balance energético.....	68
3.3	Eficiencia del colector solar con tubos de vacío .....	69
3.4	Cálculo del área de colectores solares .....	70
3.5	Cálculo del número de colectores solares .....	71
3.6	Selección del modelo de colector solar .....	71
3.7	Cálculo de pérdidas de calor en el colector .....	72
3.8	Temperatura del agua de la piscina .....	76
3.9	Diseño de la instalación.....	77
3.10	Conclusiones del capítulo.....	78
CAPÍTULO IV .....		79
ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA DE COLECTORES CON TUBOS DE VACÍO .....		79
4.1	Costos directos.....	79
4.1.1	Equipos y materiales necesarios .....	79
4.1.2	Costos de asesoría y diseño .....	80
4.1.3	Costos de mano de obra .....	81
4.1.4	Costos directos.....	82
4.2	Costos indirectos .....	82
4.3	Costo total del proyecto.....	83
4.4	Costos de operación y mantenimiento en la actualidad.....	83
4.4.1	Costos del uso de combustibles .....	83
4.4.2	Costos del tratamiento químico de la piscina .....	85
4.5	Costos de operación y del mantenimiento con los colectores .....	86
4.5.1	Consumo eléctrico mensual del equipo .....	86
4.5.2	Costos del tratamiento químico con la propuesta .....	87
4.6	Ahorro total mensual y anual proyectado con el sistema de colectores .....	88
4.7	Análisis financiero.....	88
4.7.1	Valor Actual Neto (VAN).....	89
4.7.2	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	89
4.7.3	Payback.....	90
4.8	Rentabilidad ambiental del proyecto .....	91
4.9	Conclusiones del capítulo.....	92
CONCLUSIONES GENERALES.....		94

RECOMENDACIONES GENERALES .....	96
BIBLIOGRAFÍA .....	97
ANEXOS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía primaria 2018 en el mundo .....	5
Figura 2. Capacidad de generación solar fotovoltaica .....	6
Figura 3. Insolación directa y difusa .....	7
Figura 4. Modos de aprovechamiento de la energía solar.....	8
Figura 5. Esquema de vivienda bioclimática pasiva .....	9
Figura 6. Generador fotovoltaico .....	10
Figura 7. Equipo solar térmico.....	11
Figura 8. Esquema de una planta SHIP.....	11
Figura 9. Insolación solar global horizontal en Ecuador.....	12
Figura 10. Club Castillo de Amaguaña.....	13
Figura 11. Circuito de calentamiento de las piscinas del Club .....	14
Figura 12 Esquema del sistema solar de calentamiento de agua para piscina .....	14
Figura 13. Comparación de sistemas con y sin concentración de imágenes.....	15
Figura 14. Clasificación de los colectores solares térmicos.....	16
Figura 15. Colector solar de placa plana y sus componentes principales .....	17
Figura 16. Colector parabólico compuesto y sus componentes principales.....	18
Figura 17. Aprovechamiento de la radiación en diferentes tipos de CPC .....	19
Figura 18. a) Colector solar de tubos de vacío comercial b) Tubo de vacío.....	19
Figura 19. Colector de tubo de vacío water-in-glass.....	20
Figura 20. Colector de tubos de vacío tipo U.....	21
Figura 21. Colector de tubos de vacío con heat pipe .....	22
Figura 22. Proceso de evaporación-condensación de un heat pipe.....	22
Figura 23. Ángulo horario (CND), declinación solar (VOD), latitud (POC) .....	24
Figura 24 Declinación del sol .....	25
Figura 25. Ángulos: zenit solar ( $\theta_z$ ), altitud solar ( $\alpha$ ), azimut solar ( $\gamma$ ) .....	26
Figura 26. Variación de la radiación extraterrestre durante los meses del año.....	29
Figura 27. Esquema de energías que actúan en la piscina .....	38
Figura 28. Radiación solar .....	39
Figura 29. Perdidas por convección .....	40
Figura 30. Perdidas por evaporación.....	43
Figura 31. Perdidas por conducción.....	47
Figura 32. Perdidas por radiación. ....	48

Figura 33 Radiación sobre una superficie horizontal en la ubicación del proyecto...	55
Figura 34 Radiación sobre una superficie inclinada en la ubicación del proyecto ....	57
Figura 35 Pérdidas de energía .....	68
Figura 36. Montaje para la demostración del funcionamiento de los equipos.....	69
Figura 37. Eficiencia de diferentes tipos de colectores.....	70
Figura 38 Sistema de colectores con tubos de vacío tipo mariposa.....	71
Figura 39 Parámetros del tubo de vacío.....	73
Figura 40 Evolución de la temperatura de la piscina .....	76
Figura 41 Esquema gráfico de la ubicación de los colectores .....	77
Figura 42 Circuito hidráulico de los colectores y caldero.....	78
Figura 43. Precios del galón de diésel en Ecuador en USD.....	84
Figura 44 Tipos de mantas térmicas para piscina .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de colectores solares térmicos.....	16
Tabla 2. Características típicas de un colector de tubos de vacío .....	20
Tabla 3. Número de día y número de día promedio recomendado para cada mes ....	25
Tabla 4. Valor del ángulo horario con la hora del día para el hemisferio norte.....	26
Tabla 5. Datos para el cálculo del balance energético. ....	58
Tabla 6. Propiedades y constantes utilizadas en los cálculos.....	62
Tabla 7 Datos técnicos colector de tubos de vacío modelo SNCH-50 .....	72
Tabla 8 Diámetros internos y externos del tubo de vacío. ....	73
Tabla 9. Lista de los equipos y materiales .....	80
Tabla 10. Cursos y asesorías para el diseño del proyecto. ....	81
Tabla 11. Costos de mano de obra. ....	82
Tabla 12. Resumen de los costos directos.....	82
Tabla 13. Resumen de los costos directos.....	83
Tabla 14. Resumen de los costos directos.....	83
Tabla 15. Consumo mensual de combustible.....	84
Tabla 16. Costo del consumo mensual de combustible .....	85
Tabla 17. Costo mensual del tratamiento químico de la piscina.....	85
Tabla 18. Consumo eléctrico mensual .....	86
Tabla 19. Proyección del ahorro mensual y anual en productos químicos .....	87
Tabla 20. Ahorro mensual y anual proyectado con el sistema de colectores.....	88
Tabla 21. Cálculo del VAN, TIR e IR para un periodo de 4 años. ....	90

## RESUMEN

El propósito del presente trabajo de investigación es diseñar y analizar la implementación de un sistema de climatización de agua por tubos de vacío con energía solar térmica para la piscina de 360 m<sup>3</sup> del Club Castillo de Amaguaña, con la finalidad de elevar la temperatura de 19 a 32 °C aproximadamente. Esto se ha desarrollado mediante un proceso sistemático de observación y experimentación en el lugar del proyecto, que permite obtener los datos necesarios para realizar el análisis termodinámico del sistema mediante cálculos analíticos y de esta manera determinar el número de colectores adecuado que cubran la demanda energética de la piscina, tomando en cuenta el aporte de la energía solar y la energía total necesaria para cubrir las pérdidas de calor en el vaso, que incluyen pérdidas por: evaporación, radiación, convección, conducción y renovación de agua. También se ha establecido el costo total mensual y anual del consumo de combustible y tratamientos químicos del agua que implican mantener en óptimas condiciones a la piscina, necesarios para precisar el ahorro que se obtendrá al implementar el sistema de colectores junto con una manta térmica. Una vez finalizado el estudio, se ha concluido que se requiere de 30 colectores solares de tubos de vacío modelo SNCH-50 de 50 tubos cada uno con un área de cobertura individual de 7.86 m<sup>2</sup> para el sistema de climatización de la piscina, mientras que en el análisis financiero se determinó la rentabilidad del proyecto al reflejar un TIR del 12 % con un periodo de recuperación de la inversión inicial de 4.65 años y un VAN con un costo de 2874.43 USD.

**Palabras claves:** agua, colector, confort, piscina, radiación solar, tubo de vacío.

## ABSTRACT

The main objective of this research is to design and analyze the implementation of a water heating system by vacuum tubes with solar-thermal energy for a 360 m<sup>3</sup> pool, at “Castillo de Amaguaña” in order to increase the temperature from 19 °C to approximately 32 °C. This project has been developed by a systematic process of observation and experimentation at project’s place, which allows to obtain the necessary data for develop the thermodynamic analysis of the system with analytic calculations and determine the adequate number of collectors to cover the energy demand of the pool, taking into account the contribution of sun energy and the overall energy necessary to cover heat losses in the pool, which include losses due to: evaporation, radiation convection, conduction and renewal of water. The total monthly and annual cost of fuel consumption and chemical treatments of the water have been determined, this imply keeping the pool in optimal conditions, necessary to specify the savings that will be obtained by implementing the collector system with a thermal blanket. Once the study is complete, it is concluded that the heating dimensioned system for the pool consists of 30 sun collectors per vacuum tubes model SNCH-50 of 50 tubes each one with and individual coverage area of 7.86 m<sup>2</sup>, while financial analysis determined that the project is profitable and reflects a 12% TIR and a payback time of 4.65 years and a VAN of 2874.43 USD.

**Keywords:** water, collector, comfort, swimming pool, solar radiation, vacuum tube.

## INTRODUCCIÓN

El Club Castillo de Amaguaña Corporación Civil posee 8 piscinas de las cuales 4 piscinas pertenecen a la infraestructura inicial construidas entre los años 1978 y 1983, 3 piscinas que pertenecen a la 2da etapa construidas en el año 1987 y 1 piscina construida al principio del año 2000. La capacidad de las piscinas va desde los 200 m<sup>3</sup> hasta los 400 m<sup>3</sup> de agua, la mayoría de estas calentadas con la ayuda de calderas que utilizan combustible diésel industrial, dando un servicio desde el viernes hasta el domingo. Debido al inminente incremento de los combustibles durante los últimos años se requiere de manera urgente buscar alternativas al uso hidrocarburos, ya que los costos de mantenimiento empiezan a ser cada vez más excesivos.

Las piscinas son exteriores, es decir están expuestas al medio ambiente, razón por la cual mantener la temperatura de la piscina implica un gran consumo de combustible y horas de trabajo en mantenimiento de limpieza. Se eleva y mantiene 3 días a la semana la temperatura del agua de 19 °C a 32 °C que es la temperatura de servicio.

El Club genera ingresos fijos por los pagos mensuales de sus socios, estos recursos son utilizados el mantenimiento de las instalaciones, del gasto total mensual se pretende reducir el uso de diésel mediante el sistema de colectores con tubos de vacío.

El presente trabajo está dividido en cuatro secciones, en el capítulo I se recopila la literatura actualizada sobre sistemas de calentamiento de agua con energía solar térmica, sistemas SHIP y el beneficio de utilizar energías renovables.

Las ecuaciones requeridas que permitan calcular el recurso solar, el balance y requerimiento energético en la piscina se encuentran detallados en el capítulo II.

El capítulo III se enfoca el diseño del sistema de colectores con tubos de vacío, aporte energético a la piscina considerando las condiciones de confort, comportamiento de esta durante la noche, análisis de pérdidas energéticas, arreglo serie paralelo para mejorar el rendimiento de los colectores.

Finalmente, el capítulo IV permite conocer la viabilidad financiera del proyecto utilizando los principales indicadores económicos, se detalla los gastos por concepto de uso tanto de combustible como de productos químicos, de igual manera los pronósticos de ahorros mensuales y anuales con la finalidad de saber si el proyecto es viable o no en conjunto con la recuperación de la inversión inicial.

En el Ecuador la mayoría de empresas y fábricas utilizan combustibles derivados de petróleo como GLP, diésel, fuel oil entre otros los cuales alimentan sus equipos: calderas, calefones, etc. Según la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH) en el año 2017 la demanda del sector industrial fue de 209,485,174 de galones de combustible [1]. Con la eliminación del subsidio de los combustibles de uso comercial e industrial en el año 2015 [2], se elevaron los costos de los procesos de calentamiento de piscinas y otras áreas que necesitan de agua caliente en el Club Castillo de Amaguaña que en su mayoría utilizan combustible diésel.

El problema de estudio se centra la necesidad de buscar un sistema alternativo que utilice energía renovable que permita reemplazar o complementar el sistema actual de calentamiento de piscinas que funciona mediante generación de vapor en calderas. A pesar de que existen varios tipos de sistemas solares utilizados en el calentamiento de agua, estos son utilizados en su mayoría por el sector residencial. Sin embargo, existe un bajo porcentaje de uso en el sector industrial o de servicios que utilizan estos sistemas solares ya sea por el costo, infraestructura u otras razones.

Además, otro de los factores que impulsan al Club Castillo de Amaguaña a optar por el uso de energías renovables es el factor ambiental. En el año 2018 las emisiones de CO<sub>2</sub> en el Ecuador fueron de 42 millones de toneladas ubicándose en el ranking mundial en el N°64, siendo el N°1 el país más contaminante [3], y de acuerdo al compromiso del Ecuador de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el decreto ejecutivo 840 firmado en el año 2019 [4], es indispensable como empresa contribuir a la disminución de emisión de CO<sub>2</sub>.

El objetivo general consiste en diseñar y analizar la implementación de un sistema de climatización de agua por tubos de vacío con energía solar térmica para la piscina de 360 m<sup>3</sup> del Club Castillo de Amaguaña.

Los objetivos específicos son:

- Determinar la situación energética actual del Club Castillo de Amaguaña requerida para los procesos de calentamiento de agua con base en las estadísticas del consumo y gasto mensual de agua, energía eléctrica y combustibles.
- Analizar la implementación de un sistema de climatización solar con tubos de vacío para una piscina de 360 m<sup>3</sup> del Club Castillo de Amaguaña previo al diseño de una instalación solar térmica que suministre agua a una temperatura de 30 °C.
- Definir la rentabilidad del sistema de climatización de agua bajo el ámbito de costo beneficio con base al presupuesto del Club Castillo de Amaguaña.

# CAPÍTULO I

## ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS

El presente capítulo tiene como objetivo resaltar los estudios e investigaciones que abarcan el área de las energías renovables, específicamente de la energía solar térmica con un énfasis en el uso de la energía solar para procesos industriales o SHIP por sus siglas en inglés. A su vez se hará una recopilación y revisión extensa de la literatura reciente sobre trabajos de investigación realizados a colectores solares térmicos con tubos de vacío y sus aplicaciones.

### 1.1 Estado del arte

En la actualidad es evidente que el consumo energético mundial está basado en el uso de combustibles fósiles, y es de conocimiento general que la duración de estos es limitada y que en un futuro cercano o no, estos recursos energéticos se agotarán. Del mismo modo son bien conocidos todos los problemas ambientales que generan el uso de este tipo de combustibles los cuales deterioran el medio ambiente. Son estas varias de las razones por las cuales los estudios de energías renovables son cada vez más importantes, entre ellos los de energía solar, el desarrollo de nuevas tecnologías y modelos que aprovechen este tipo de energías los cuales dan una esperanza de alivio a nuestro agotado ecosistema [5].

Farjana et al. [6] en su investigación brindan una descripción detallada del potencial actual y los aspectos futuros de incluir sistemas de calentamiento usando energía solar dentro de procesos industriales, teniendo en cuenta el nivel de temperatura y el tipo de colector solar que se use. De este modo muestran que este tipo de energía es aplicable a todos los países dentro del mismo tipo de industria, junto con condiciones climáticas y económicas similares, concluyen que la energía solar debería tener una oportunidad, a pesar de que en un inicio los costos pueden no ser favorables, debido al agotamiento de las reservas de petróleo y al incremento de los precios de este.

Chopra et al. [7] en su investigación que abarcan los colectores de tubos de vacío de flujo directo con y sin tubos de calor, manifiestan que las aplicaciones más influyentes de estos son la climatización y calentamiento de agua, calentamiento de aire y la desalinización además de varias ventajas, como la flexibilidad en la operación,

efectividad en la transferencia de calor incluso cuando es mínima la diferencia de temperatura, ya que la envoltura de vacío que envuelve a los tubos reduce las pérdidas por conducción y convección, por lo tanto funcionan mejor que otros sistemas en condiciones desfavorables.

Debido a que solo es posible utilizar una fracción de la energía que proviene del sol y que el resto se refleja hacia el espacio ha sido necesario desarrollar un dispositivo que recolecte esta energía solar de manera eficiente, justamente los tubos de vacío tienen la capacidad de recolectar la radiación solar durante todo el día debido a su forma cilíndrica. Según Medava et al. [8] en su estudio sobre las aplicaciones del colector de tubos de vacío para aprovechar la energía solar expresan que, los problemas de rendimiento y eficiencia de la energía solar se lograrían resolver utilizando tubos de vacío, ya que este vacío dentro del tubo le permite almacenar un alto porcentaje de calor lo que mejora su productividad y afirman que, el colector de tubos de vacío es el equipo más adecuado que se puede utilizar en aplicaciones solares térmicas de baja y mediana temperatura.

Las actividades del sector industrial alrededor del mundo consumen la mayor parte de su energía en forma de energía eléctrica y energía térmica, según Sharma et al. [9] precisan en su publicación que, la energía térmica la utilizan en el calentamiento de procesos industriales SHIP (Solar Heat Industrial Processes, por sus siglas en inglés) como son (limpieza, secado, destilación, pasteurización, esterilización, cocción entre otros) que se encuentran en el rango de temperatura baja-media y que los colectores solares térmicos pueden cubrir esta demanda de manera eficiente, incluso aducen que; actualmente existen varias tecnologías de concentradores solares que pueden generar calor a temperaturas de hasta 300 °C, adicional a esto exclaman que, el aporte a la reducción de los gases de efecto invernadero con el uso de tecnologías SHIP es una opción atractiva y viable.

Li et al. [10] realizaron un estudio experimental y de simulación sobre la transferencia de calor por convección de un colector solar térmico, de 24 tubos de vacío de doble hilera donde analizaron el rendimiento térmico a diferentes ángulos de declinación [ $q_m > 0^\circ$ ]  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  y  $6^\circ$ , afirmando que al aumentar  $q_m$ , la velocidad del agua fría del

colector y el agua caliente que regresa al colector aumentó y la convección natural se hizo más intensa, mientras que el coeficiente de pérdida de calor no sufrió un cambio significativo. Además, expresaron que, debe evitarse en medida de lo posible el ángulo de inversión [ $q_m < 0^\circ$ ] ya que, el agua caliente queda atrapada en el extremo sellado del tubo originando que la tasa de transferencia de calor sea insuficiente y por lo tanto disminuyendo la eficiencia.

Los colectores solares térmicos están siendo reconocidos como una alternativa frente al uso de combustibles fósiles en los procesos industriales debido a los beneficios ambientales, seguridad energética y viabilidad económica que estos presentan, así lo anuncia Kumar et al. [11] en su revisión sobre el avance global de las tecnologías de energía solar térmica sobre el calor de procesos industriales, además expresan que, para requisitos de temperatura entre 50 y 200 °C los colectores de tubos de vacío “Evacuated Collector Tube (ETC)” se presentan como la mejor alternativa y en caso de requerirse una temperatura de proceso más alta, la conexión en cascada de múltiples ETC es una de las posibles opciones que puede satisfacer dicha demanda.

Estudios experimentales que determinar el rendimiento energético de colectores solares de tubos de vacío se han realizado en varios puntos del globo terrestre, uno de estos es el de Siuta-Olcha et al. [12] quienes presentan los resultados de un colector que consta de 24 tubos y un área bruta de 3.9 m<sup>2</sup>, el cual se realiza por un periodo de dos meses en la localidad de Lublin, Polonia, durante el mes de julio la irradiación solar fue de 80 kW·h/m<sup>2</sup>, y en agosto fue de 112.8 kW·h/m<sup>2</sup>, obteniendo una ganancia térmica promedio de 163 W/m<sup>2</sup> y 145 W/m<sup>2</sup> respectivamente y unas eficiencias energéticas mensuales promedio de 45.3 % en julio y 32.9 % en agosto.

En el continente americano también se tienen varios estudios relacionados al mismo tema como el realizado por Lugo et al.[13] donde presentan un modelo matemático, que simula un sistema de calefacción solar en piscinas de 53.8 m<sup>3</sup> en varias regiones de México, usando datos obtenidos entre marzo del 2016 y junio del 2017, logrando generar un modelo bastante preciso, el cual puede brindar una gran ayuda en las investigaciones que se enfoquen al cálculo de rendimiento energético de los colectores solares, teniendo en cuenta la ubicación de las piscinas a investigar.

Gonçalves et al.[14] presentan un estudio que predice el rendimiento energético a largo plazo de sistemas de calentamiento solar en piscinas de ciudades de Brasil, manteniendo el área de las piscinas constantes y utilizando datos de la velocidad del viento, temperatura ambiente, radiación en una superficie horizontal e índice de claridad, específicos en cada ciudad obtenidos de la base de datos del software Meteonorm, concluyendo que los colectores pueden trabajar con áreas de 150 m<sup>2</sup>, manteniendo una temperatura de 30 °C.

## **1.2 Aspectos teóricos**

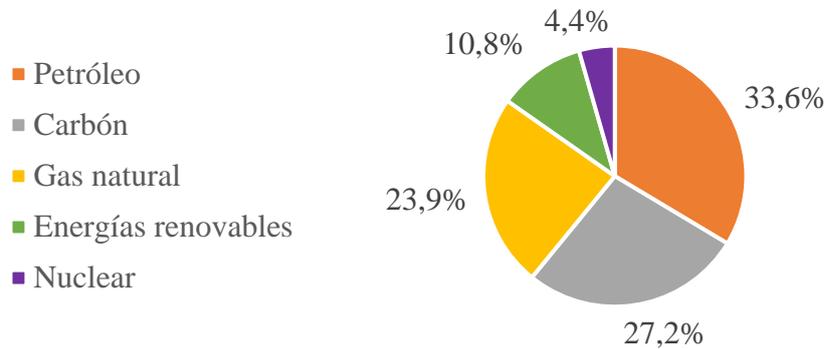
### **1.2.1 Energías renovables**

La energía es primordial en el desarrollo de la vida tal y como se conoce, sin embargo, la humanidad dispone de ella sin contemplar el impacto ambiental que se origina al explotar las fuentes y recursos energéticos. La mayor cantidad de energía se obtiene de la quema de los combustibles fósiles, esto provee el 66 % de energía eléctrica a nivel mundial y satisface en un 95 % la demanda energética del mundo al incorporar a los transportes, calentamiento y otros usos, su principal ventaja es su inmediata disponibilidad. Como resultado de la quema de este tipo de combustibles se origina la acumulación de dióxido de carbono en el ambiente, esto contribuye al calentamiento global, encadena cambios en el entorno y por consecuencia, sobre las realidades sociales y económicas del ser humano [15].

Mientras tanto la energía renovable es aquella basada en la utilización de recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente como el sol, viento, agua y biomasa vegetal o animal. Este tipo de energías en teoría pueden cubrir la demanda mundial sin ningún problema, sin que esto signifique, que la transición del suministro actual de energía basada en la quema de combustibles fósiles a los suministros de energía renovable sea posible fácilmente. Por el contrario, los suministros de energía renovable necesitan una infraestructura totalmente diferente en comparación con lo que se ha desarrollado, sin embargo, la transformación del suministro de energía es el desafío más importante el cual permita garantizar el cuidado de la vida en el planeta [16].

En la Figura 1 se observa porcentualmente el consumo de energía primaria en el mundo durante el año 2018, se puede distinguir que el uso de energías renovables aún es muy

bajo, por lo tanto, es importante desarrollar nuevas tecnologías que permitan aumentar el consumo de estas y disminuir la contaminación ambiental.



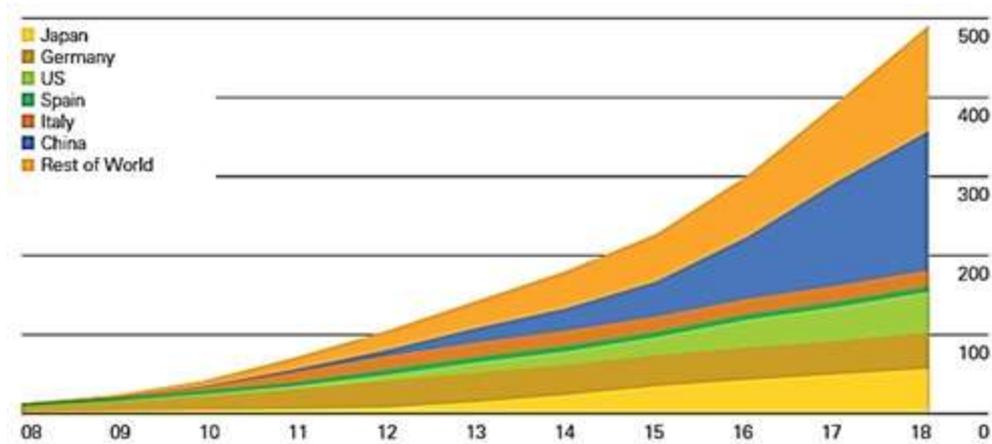
**Figura 1.** Consumo de energía primaria 2018 en el mundo [17].

En el Ecuador, existe un gran potencial para desarrollar tecnologías que permitan aprovechar las energías renovables, esto se debe a sus condiciones geográficas privilegiadas, sin embargo, aún son muy pocos los proyectos energéticos en los que se ha implementado el uso de las mismas y su presencia en la matriz energética del país es muy reducida, puesto que aproximadamente el 95 % de la energía primaria producida está constituida por combustibles fósiles, el 91 % petróleo y el 4 % gas natural, dejando tan solo alrededor del 5 % correspondiente a energías renovables, en las que se destacan la hidráulica y la biomasa [18].

### 1.2.2 Energía solar

El sol es la más importante fuente de energía libre e inagotable del planeta Tierra, provee de energía limpia, de fácil acceso, gratuita y ambientalmente amigable. En la actualidad, se están empleando nuevas tecnologías que permitan generar electricidad y calor a partir de esta fuente energética, por lo que es cada vez más frecuente encontrar estudios, prácticas y pruebas relacionadas al ámbito solar en diversas partes del mundo como alternativa de energía renovable [19].

La Figura 2, muestra una comparación de la capacidad de generación solar fotovoltaica entre diversos países en el año 2018. En teoría, la energía solar posee el potencial de satisfacer las demandas energéticas mundiales si la tecnología para su almacenamiento y distribución fuese la adecuada.



**Figura 2.** Capacidad de generación solar fotovoltaica [20].

El potencial de la energía que brinda el sol al planeta para satisfacer las necesidades humanas es gigantesco, sin embargo, está determinado por factores naturales como, latitud, variación geográfica, clima, entre otros. Debido a esto la intensidad del influjo solar que pasa a través de la atmósfera de la Tierra no es igual ni constante, haciendo su recolección más compleja. La cantidad promedio de energía solar recibida en la atmósfera terrestre es de alrededor de  $342 \text{ W/m}^2$ , de los cuales el 30 % se dispersa o se refleja de vuelta al espacio, dejando aproximadamente el 70 %,  $239 \text{ W/m}^2$  disponible para su aprovechamiento [21].

Núñez et al. [22] en su estudio mencionan que, la energía solar es aquella obtenida por la luz y el calor emitidos por el sol. La radiación solar que llega a la Tierra se puede usar en forma de calor o por conversión fotovoltaica, esto hace que sea una energía sumamente limpia, sin embargo, los residuos generados por la infraestructura necesaria al procesar este tipo de energía son difíciles de reciclar, un ejemplo de esto son los paneles solares.

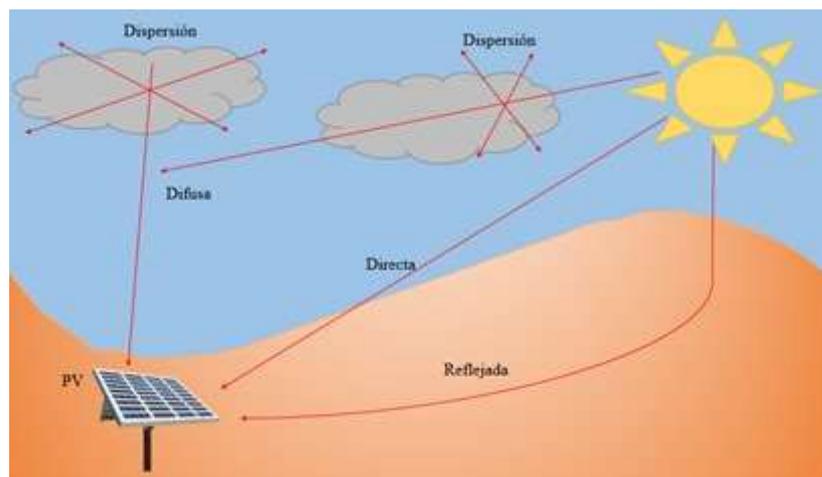
Ecuador tiene un gran potencial de energía solar debido a estar ubicado sobre la línea ecuatorial, uno de los beneficios de su localización es la mínima variación de este recurso a lo largo del año, esto le brinda ventajas en el aprovechamiento de esta energía, a pesar de ello, el uso de la misma es muy baja en la matriz energética nacional, tan solo un 0.15 % de la electricidad consumida por el país es por generación de energía solar fotovoltaica, sin embargo cada vez son más los estudios realizados

para el aprovechamiento de la misma, siendo de vital importancia el desarrollo e implementación de tecnologías solares en el país.[23]

### 1.2.3 Insolación

La insolación corresponde a la cantidad de energía solar que llega a una superficie medida en  $W \cdot h/m^2$ , en otras palabras, es la cantidad de energía radiante que incide en un área por un intervalo de tiempo, también se la conoce en términos de horas solares pico. A la superficie del planeta la insolación llega de forma directa o difusa [24].

Se origina insolación directa cuando los rayos solares que llegan al planeta no son desviados, ni se desvanecen al atravesar la atmosfera de la tierra, mientras que la insolación difusa se deriva de la bóveda celeste como consecuencia de la diseminación de la radiación solar en el ambiente terrestre. Se podría considerar que esta energía es alrededor de un 15 % de la insolación en los días más soleados, sin embargo, en días con insolación directa muy baja, el porcentaje de la insolación difusa será mayor [24]. Al observar la figura 3 se comprenden mejor estos conceptos.



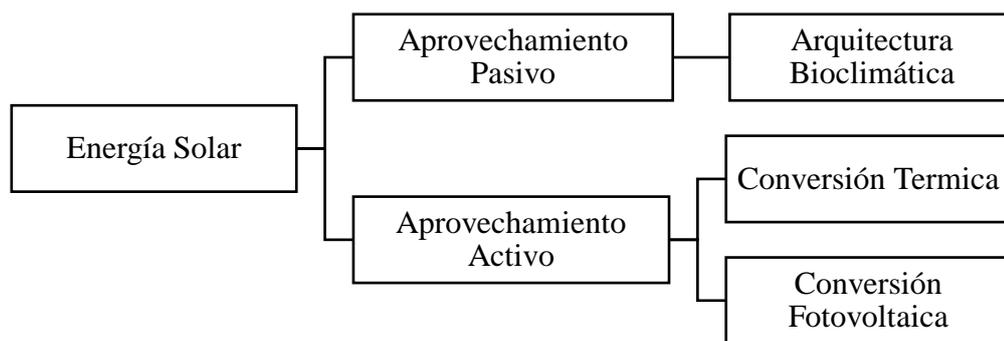
**Figura 3.** Insolación directa y difusa [25].

La energía útil que entregan los paneles solares fotovoltaicos es directamente proporcional a la insolación incidente. Mientras la insolación directa incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo, la difusa cae en esa superficie con varios ángulos. Cuando la insolación directa no llega a una superficie a causa de la presencia de un obstáculo, el área que se encuentra a la sombra no está completamente

a oscuras gracias a la insolación difusa. Por ello, los dispositivos fotovoltaicos pueden funcionar incluso solamente con insolación difusa [25].

#### 1.2.4 Aprovechamiento de la energía solar

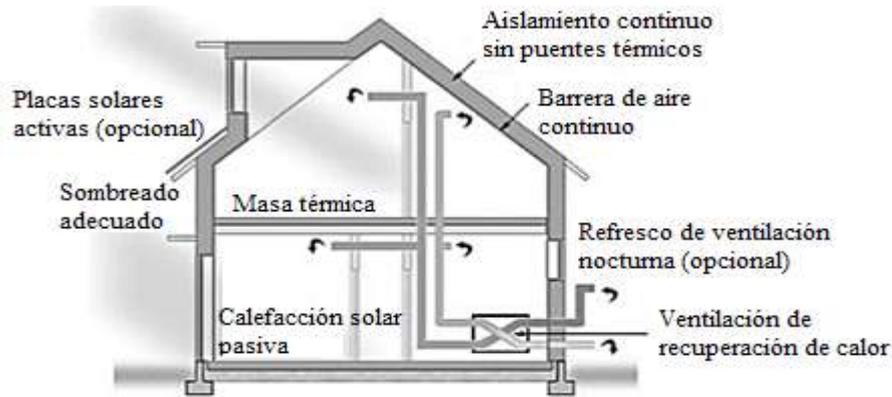
La tecnología con la que cuenta el ser humano, en la actualidad, permite aprovechar la energía solar incidente, de forma pasiva a través de tecnologías constructivas o de forma activa, mediante la utilización de tecnologías de conversión térmica o fotovoltaica, como se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Modos de aprovechamiento de la energía solar. Elaborado por Carvajal & Mejía.

##### 1.2.4.1 Aprovechamiento pasivo

Consiste en obtener los beneficios de la energía solar de forma directa sin tener que transformarla en otro tipo de energía, se busca poder utilizarla inmediatamente o almacenarla sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía. Esta tecnología está relacionada con la arquitectura bioclimática o arquitectura solar pasiva, la cual se enfoca en captar, almacenar y distribuir la energía solar a través de diferentes estructuras constructivas y de esta manera aprovechar al máximo esta energía, considerando factores como el entorno, materiales, forma y orientación de los edificios, techos, aislamiento térmico, entre otros. Con ello se reducen las necesidades de iluminación, calefacción y enfriamiento [18]. En la Figura 5 se muestra el esquema de una construcción bioclimática pasiva.



**Figura 5.** Esquema de vivienda bioclimática pasiva [18].

#### ***1.2.4.2 Aprovechamiento activo***

Consiste en emplear la energía solar mediante su concentración, conversión en calor y en varias ocasiones generación de energía eléctrica. El calor suele emplearse en la cocción de productos alimenticios, generación de agua caliente de uso doméstico, donde sobresale la calefacción y el agua caliente sanitaria. Así como también se utiliza en la obtención de energía mecánica y derivada de ella, energía eléctrica, a través de los sistemas termo solares de concentración. Esto requiere utilizar aparatos que capturen y transformen la energía procedente del sol, debido a esto el aprovechamiento activo utiliza dos alternativas posibles, las cuales son: la conversión fotovoltaica y la conversión térmica [18].

#### ***1.2.4.3 Conversión fotovoltaica***

La tecnología fotovoltaica busca convertir directamente la radiación solar en electricidad. Está basada en el efecto fotoeléctrico, en esto se emplea dispositivos llamados celdas fotovoltaicas, los mismos que son semiconductores sensibles a la luz solar; por lo que cuando se expone a esta, se produce en la celda una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras. Los componentes de un sistema fotovoltaico dependen del tipo de aplicación que se considera, si van o no conectados a la red y de las características de la instalación. Este tipo de instalación está formada por equipos que deben producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica [26]. La figura 6, muestra un generador fotovoltaico instalado en el techo de una construcción.



**Figura 6.** Generador fotovoltaico [25].

#### ***1.2.4.4 Conversión térmica***

La tecnología de conversión térmica se enfoca en transformar la energía de radiación solar en calor, su principal componente es un captador, por el cual circula un fluido que absorbe la energía de radiación del sol. De acuerdo con la temperatura de aprovechamiento se clasifican en de alta, media y baja, siendo sus límites:

- Hasta 100 °C de baja temperatura
- Desde 100 °C y hasta 300° C de mediana temperatura
- Mayores a 300 °C de alta temperatura

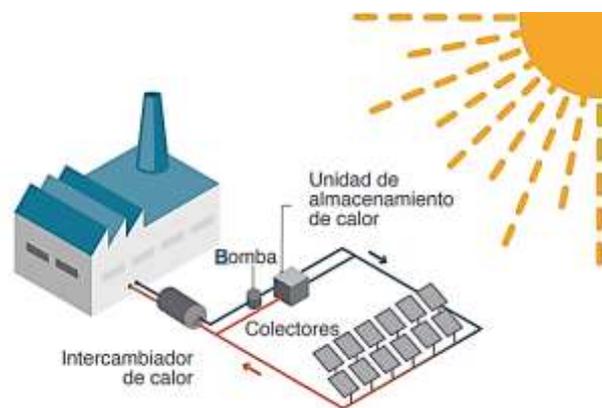
Los sistemas solares térmicos de alta temperatura alcanzan temperaturas superiores a los 4000 °C, son grandes instalaciones donde el principal elemento es una torre paraboloide, o un campo de helióstatos que concentran la radiación solar en una torre central; normalmente cuentan con una caldera central de la que se obtiene vapor a alta temperatura empleado en usos industriales, térmicos o en la generación de electricidad. Los de mediana temperatura como se muestra en la Figura 7 utilizan colectores que concentran la radiación solar en un tubo colector encargado de recibir y transmitir el calor, alcanzando valores de temperatura de hasta 300° C [26].



**Figura 7.** Equipo solar térmico[25].

### 1.2.5 Calor solar para procesos industriales (SHIP)

SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) es un acrónimo empleado en procedimientos industriales que utilizan energía solar. En la Figura 8 se puede observar la distribución de una planta industrial que utiliza el sistema SHIP, el campo de colectores se encarga de captar la radiación solar para calentar el fluido de trabajo dentro del proceso industrial, mientras que los intercambiadores entregan este calor en forma de agua caliente, flujo de aire a altas temperaturas o vapor, a uno o varios procesos productivos dentro de la planta industrial. El propósito de las unidades de almacenamiento es posibilitar que el calor generado durante el día, pueda ser empleado también al anochecer [27].



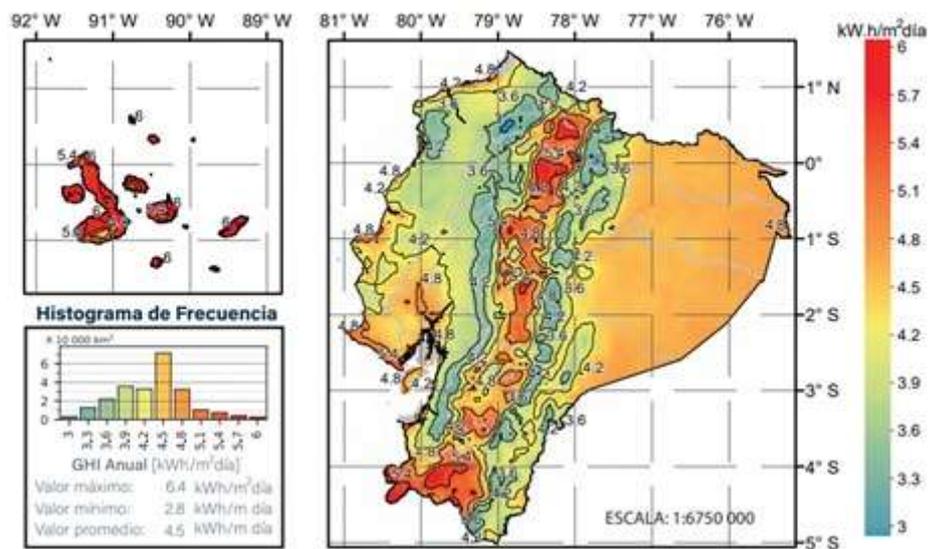
**Figura 8.** Esquema de una planta SHIP [27].

### 1.2.6 Energía solar en el Ecuador

La ubicación privilegiada y las características topográficas tan variadas del Ecuador le brindan una gran diversidad climática, junto a un potencial latente muy grande con

respecto a energías limpias y renovables, entre estas destaca la energía solar, sin embargo, es necesario desarrollar la infraestructura y las tecnologías que permitan obtener beneficios de ésta en diversas aplicaciones. El calor recogido en colectores se puede destinar a satisfacer diferentes tipos de necesidades, como calefacción, refrigeración, hornos, en fines agrícolas, secadores, plantas de purificación, desalinización de agua, entre otras [24].

La Figura 9, presenta los datos expuestos en el mapa solar del Ecuador 2019 y muestra la irradiación solar global horizontal anual en el país.



**Figura 9.** Insolación solar global horizontal en Ecuador [23].

En Ecuador la radiación solar global se tasa en  $4575 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$ , aproximadamente según los datos mostrados en la figura anterior. Se estima que el potencial energético solar aprovechable en la obtención de electricidad ronda los 312 GW correspondiente a 456 TWh por año o 283 MBEP (millones de barriles equivalentes de petróleo) por año, lo que es igual a tener quince veces el potencial hidroeléctrico, tanto técnico como económicamente útil del Ecuador [28].

Las provincias de Loja, Tungurahua, Pichincha e Imbabura son las que cuentan con mayor potencial para la generación de energía derivada de la radiación solar; sin embargo, a pesar de que Ecuador cuenta con datos favorables respecto a energía solar,

no tiene el desarrollo ni la tecnología necesaria que permita explotar al máximo las ventajas geográficas que posee [28].

### 1.2.7 Club Castillo de Amaguaña

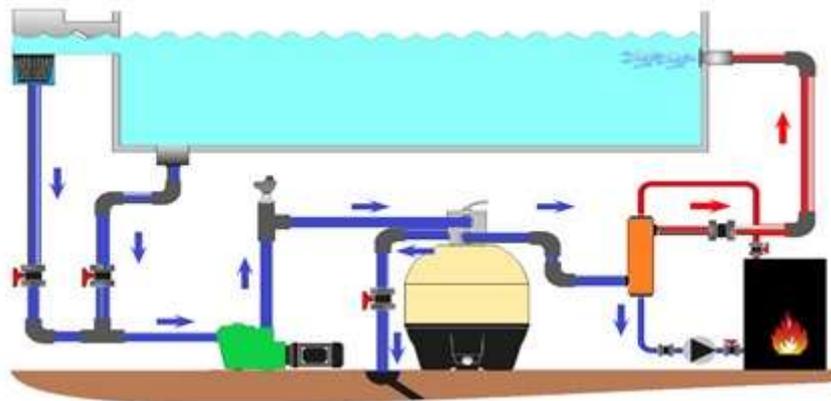
El Club Castillo de Amaguaña es una Corporación Civil sin fines de lucro que se encuentra ubicada en Ecuador al Sur de su Capital Quito en la Parroquia de Amaguaña, sus instalaciones constan de 21 hectáreas divididas en 3 etapas y cada una de éstas con servicios diferentes en donde se realizan actividades recreativas y de esparcimiento exclusivo de los socios del club. Su logo como se muestra en la Figura 10 muestra su lema institucional “Familiar y Solidario”, entre las actividades que realizan los socios se encuentran el uso de múltiples piscinas recreacionales y de entrenamiento, saunas, turcos, spa, pista de hielo, escalada, lago con botes, área de picnic, canchas deportivas en los que se practica diferentes disciplinas como: ráquetbol, squash, tenis, fútbol, vóley, básquetbol, entre otros. Además, el Club Castillo de Amaguaña ofrece el servicio de alquiler de sus instalaciones para realizar eventos corporativos o empresariales y sociales tanto a socios del club como a personas particulares [29]-[30].



**Figura 10.** Club Castillo de Amaguaña [30].

Actualmente, el Club Castillo de Amaguaña posee 8 piscinas de diferente capacidad distribuidas en sus tres etapas, todas las piscinas son calentadas mediante intercambiadores de calor con el vapor generado en calderas como se observa en la Figura 11, y poseen 2 sistemas auxiliares de calentamiento mediante bombas de calor para recircular el agua y mantenerla a temperatura ambiente. Con la eliminación del subsidio de los combustibles de uso comercial e industrial en el año 2015 [2], se elevaron los costos de los procesos de calentamiento de piscinas y otras áreas que

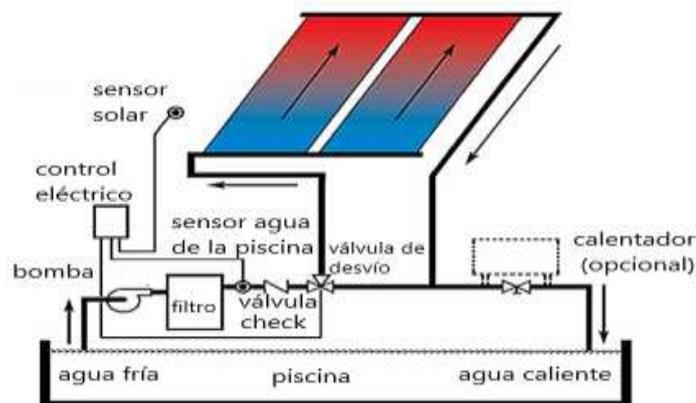
necesitan de agua caliente en el Club Castillo de Amaguaña que en su mayoría utilizan combustible diésel.



**Figura 11.** Circuito de calentamiento de las piscinas del Club.

### 1.2.8 Sistemas que utilizan energía solar para calentar piscinas

Los sistemas de calentamiento solares de piscinas no requieren de un tanque de almacenamiento externo ya que la misma piscina sirve como almacenamiento, en la mayoría de casos la bomba de filtración de la piscina se utiliza para hacer recircular el agua a través de los colectores solares como se observa en la Figura 12. Las piscinas generalmente operan en un rango de temperatura de 24 °C a 32 °C. Debido a que la piscina tiene una gran masa de agua, su temperatura no cambia rápidamente, sin embargo, el uso de cobertores en la piscina reduce las pérdidas de calor principalmente por evaporación [31].



**Figura 12** Esquema del proceso de calentamiento de agua con energía solar [32].

Según García y Pilatowsky [33] los colectores solares son los sistemas más económicamente viables ya que los retornos de inversión son en la mayoría de casos inferiores a un año e incluso se pueden reducir si se complementan las piscinas con cobertores cuando no se encuentran en servicio.

### 1.2.9 Los colectores solares con y sin concentración de imagen

La concentración se logra obtener de dos maneras: debido a la reflexión o refracción de la radiación solar a través del uso de espejos. Esta luz reflejada se junta en un punto focal, lo que incrementa el paso de energía en el objeto receptor. Los concentradores sin imagen no producen ninguna imagen óptica de la fuente, a diferencia de los concentradores de imagen, que producen una imagen del sol al reflejarla en el receptor.

El sistema de concentración de imágenes forma las imágenes de los puntos fuente 'A' y 'B' en el receptor, mientras que el sistema de concentración sin imágenes no forma dicha imagen como se observa en la Figura 13. Sin embargo, en los concentradores sin imagen, la potencia de radiación incidente en la abertura se transfiere de manera más eficiente al receptor [34] - [35].

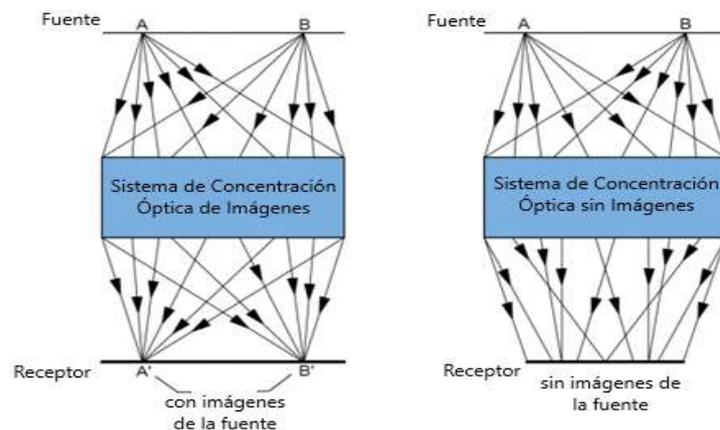
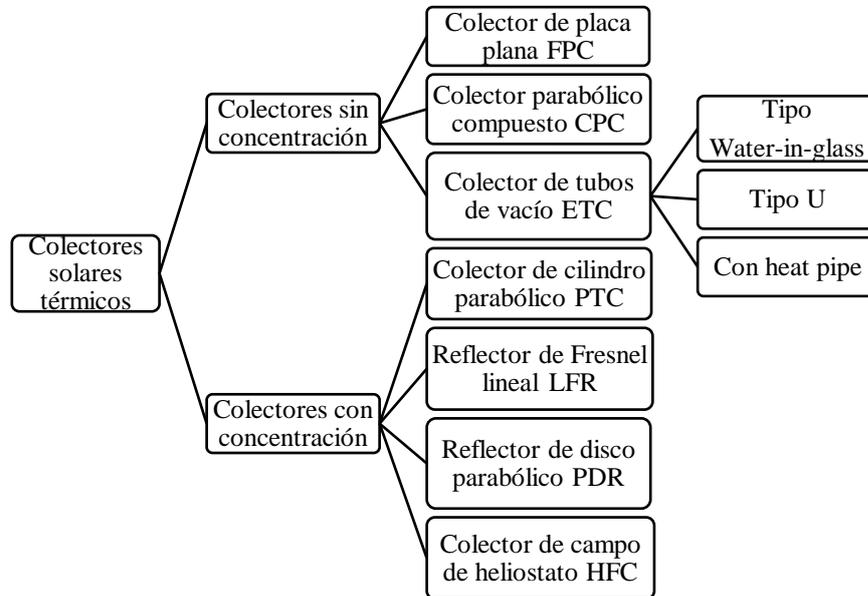


Figura 13. Comparación de sistemas con y sin concentración de imágenes [35]

### 1.2.10 Colector solar térmico

El dispositivo más importante de un proceso solar de climatización o calentamiento es el colector solar térmico, el cual recoge la radiación solar entrante, lo convierte en calor y transfiere este calor a un fluido de trabajo como aire, agua, aceite u otros, el cual fluye a través del colector. La energía solar recolectada se transporta desde el

fluido circulante, ya sea directamente al agua caliente o al equipo de acondicionamiento del espacio, o a un tanque de almacenamiento de energía térmica desde el cual se puede extraer el calor para usarlo posteriormente [36]. La categorización de los colectores solares térmicos se detalla en la Figura 14.



**Figura 14.** Clasificación de los colectores solares térmicos [11].

Una gran cantidad de colectores solares se encuentran actualmente disponibles en el mercado. A continuación, se presenta una revisión de los diferentes tipos de colectores disponibles en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tipos de colectores solares térmicos [37].

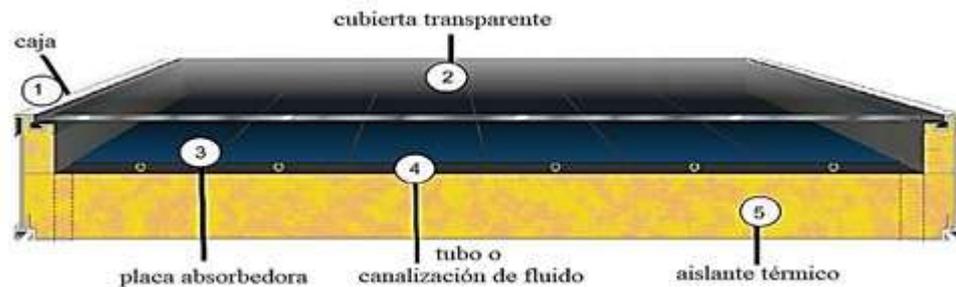
Movimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	Relación de concentración	Rango de temperatura (°C)
Estacionario	FPC	Plano	1	30-80
	ETC	Plano	1	50-200
	CPC	Tubular	1-5	60-240
Seguimiento de eje único	LFR	Tubular	10-40	60-250
	PTC	Tubular	15-45	60-300
Seguimiento de dos ejes	PDR	Puntual	100-1000	100-500
	HFC	Puntual	100-1000	150-2000

### 1.2.11 Colector solar de placa plana

El FPC “Flat Plate Collector FPC” como se muestra en la Figura 15 se encuentra fácilmente disponible en el mercado, se utiliza en calefacción de bajas temperaturas y en el calentamiento de agua de áreas residenciales y piscinas cubiertas alcanzando temperaturas de hasta 100 °C [38]-[39].

La operación de este sistema comienza en el momento en que la radiación solar atraviesa la cubierta cristalina e influye sobre la capa superficial absorbente oscurecida de gran absorción, la placa recoge la mayor parte de esta energía y la envía al medio de transporte ubicada en los tubos de fluido que inmediatamente es enviada a su almacenamiento para un posterior uso [38].

Los componentes principales de un colector de placa plana convencional se muestran en la Figura 15.



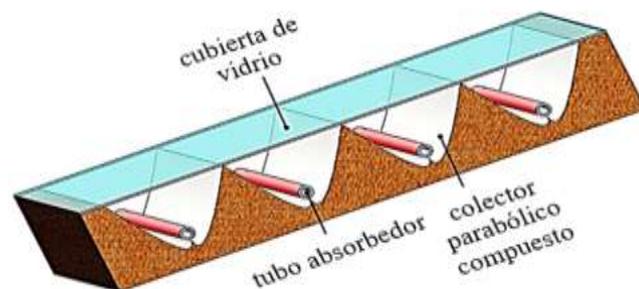
**Figura 15.** Colector solar de placa plana y sus componentes principales [38].

- Caja: Elaborada de aluminio, acero, madera o algún material sintético, además de asegurar la estabilidad protege la placa, tubos absorbedores y el material aislante de los efectos del medio ambiente [38].
- Cubierta transparente: Permite una alta transmisividad y disminuye las pérdidas por convección sobre la placa absorbente, los factores como alta transmisividad, alta estabilidad de temperatura y baja expansión térmica son claves para utilizar cubiertas transparentes adicionales.
- Placa absorbedora: Elaborados comúnmente de cobre, de igual manera se suele utilizar aluminio los cuales permiten reducir los costos de fabricación.

- Tubo o canalización de fluido: Este diseño asegura una alta tasa de transferencia de calor, en su fabricación se utiliza cobre, sin embargo, en aplicaciones corrosivas se utiliza acero inoxidable.
- Aislante térmico: Debido a que estas tecnologías alcanzan elevadas temperaturas, es necesario colocar un aislamiento térmico que permita reducir las pérdidas de calor, pueden ser lana mineral, roca o poliuretano [38].

### 1.2.12 Colector parabólico compuesto

El colector parabólico compuesto “Compound Parabolic Concentration CPC” es un colector sin concentración de imagen, posee una cubierta transparente que permite una alta transmisividad y disminuye las pérdidas por convección, además posee debajo de cada tubo del colector se instala una lámina fabricada de material reflectante de forma parabólica como se observa en la Figura 16. El rango de temperatura varía desde los 60°C hasta los 240 °C [11].



**Figura 16.** Colector parabólico compuesto y sus componentes principales [11].

Dependiendo del ángulo de captación del colector, son de seguimiento y estacionario. Si es de seguimiento puede orientarse con su eje largo a lo largo de la dirección norte-sur o este-oeste y su apertura está inclinada directamente hacia el ecuador en un ángulo igual a la latitud local. Cuando se orienta a lo largo de la dirección norte-sur, el colector debe seguir al sol girando su eje mirándolo continuamente, si es estacionario solo se recibirá la radiación en las horas en que el sol esté dentro del ángulo de captación del colector [31].

Los CPC pueden captar la radiación incidente en un rango extenso de ángulos al utilizar varios reflejos internos como se indica en la Figura 17, la radiación que ingrese

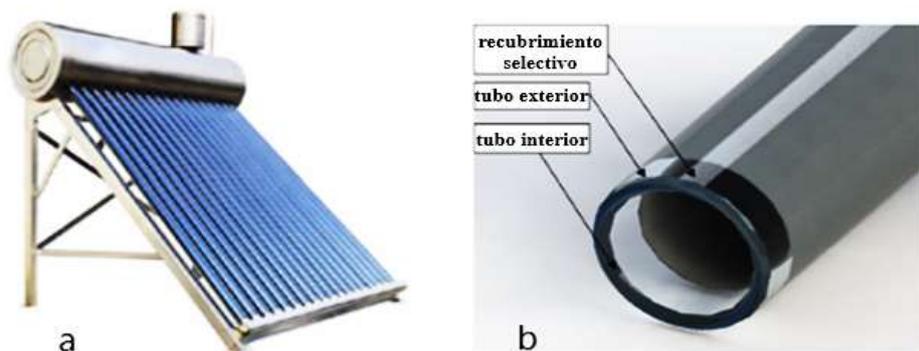
al espacio interno del ángulo de captación del colector llega a la superficie del tubo absorbedor y calienta el fluido de trabajo que posteriormente será utilizado en diversas aplicaciones [40].



**Figura 17.** Aprovechamiento de la radiación en diferentes tipos de CPC [40].

### 1.2.13 Colector con tubos de vacío o evacuados

El ETC “Evacuated Tube Collector” consta de un arreglo de tubos de vidrio colocados en paralelo Figura 18a, cada tubo contiene un tubo concéntrico secundario tratado con pintura selectiva de color oscuro capaz de absorber la radiación solar como se indica en la Figura 18b, el espacio entre los tubos concéntricos está vaciado, este vacío ( $<10^{-2} Pa$ ) reduce las pérdidas de calor tanto por conducción y convección. Los colectores de tubos de vacío se utilizan frecuentemente para aplicaciones de temperatura media, de 60 °C a 80 °C y/o en climas muy fríos. En este estudio se utilizan tubos de vacío de la marca INSTAMATIC distribuidos por la empresa DISTEC (Energía del futuro), ubicada en Quito-Ecuador, la misma que comercializa una patente australiana de este tipo de elementos, los datos económicos son detallados en el capítulo IV, mientras que las características generales del tubo se pueden apreciar en la Tabla 2. [38]-[41].



**Figura 18.** a) Colector solar comercial b) Tubo de vacío [42]-[43].

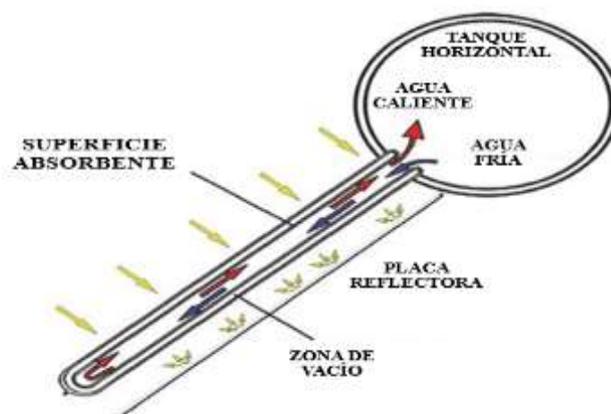
Los tubos de vacío entran en funcionamiento cuando los rayos de luz atraviesan el tubo exterior transparente y son absorbidos mediante la pintura selectiva por el tubo interior, ambos tubos interior y exterior poseen propiedades de reflexión mínimas. Mientras la luz del sol pasa a través del tubo exterior el tubo interior se calienta, para mantener el calor se crea un vacío el cual permite que la radiación solar pase y a su vez impide que el calor se transfiera al exterior, por lo que el calor permanece al interior de los tubos internos del colector mientras recoge eficientemente la radiación solar [43].

**Tabla 2.** Características típicas de un colector de tubos de vacío [31].

Parámetros	Valor
Tubo de vidrio	Diámetro 65 mm
Espesor de vidrio	1.6 mm
Longitud del colector	1965 mm
Material de placa absorbente	Cobre
Recubrimiento	Selectivo
Área de absorción	0.1 m <sup>2</sup>

### 1.2.13.1 Colector de tubo de vacío water-in-glass

Un ETC water-in-glass consta generalmente de unos 15 a 50 tubos llenos de agua conectados de manera directa a un tanque de reserva de agua horizontal como se indica en la Figura 19. El tubo de vacío consta de un par de tubos de vidrio colocados concéntricamente uno del otro y hermético en un extremo, realizado un vacío en el espacio anular entre estos dos tubos y recubierto con una superficie selectiva en la superficie externa del tubo interno [31]-[41].

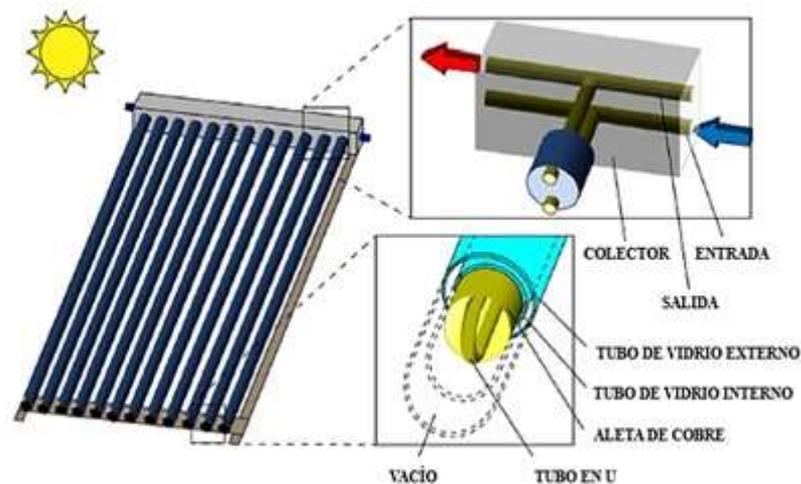


**Figura 19.** Colector de tubo de vacío water-in-glass [36].

La transferencia de calor está determinada por el flujo natural del agua por la abertura de un extremo en el tanque. La radiación solar calienta el agua la cual se eleva progresivamente a lo largo de la parte superior del tubo hasta el tanque de almacenamiento y el agua más cálida se sustituye por agua más fría derivada del tanque. Es un equipo altamente eficiente, diseño simple y con un bajo costo de fabricación muy utilizado en China [36].

### 1.2.13.2 *Colector solar tipo U*

De acuerdo con Chopra et al. [7] estos colectores se caracterizan por llevar los tubos de calor generalmente fabricados de cobre colocados en el centro de los tubos de vacío, un tubo actúa como entrada y el otro como salida del fluido térmico, ambos tubos de cobre están unidos en el fondo del tubo de vacío en forma de U como se observa en la Figura 20, de ahí su nombre.



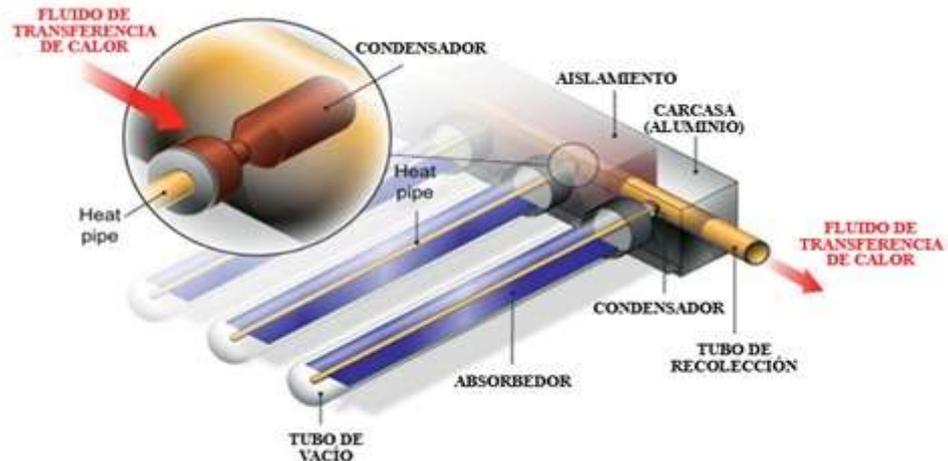
**Figura 20.** Colector de tubos de vacío tipo U [44].

Además, puede tener aletas metálicas fijadas a lo largo del tubo tipo U que incrementan la transferencia de calor entre la superficie interna del tubo de vacío y el fluido de trabajo.

### 1.2.13.3 *Colector de tubos de vacío con heat pipe*

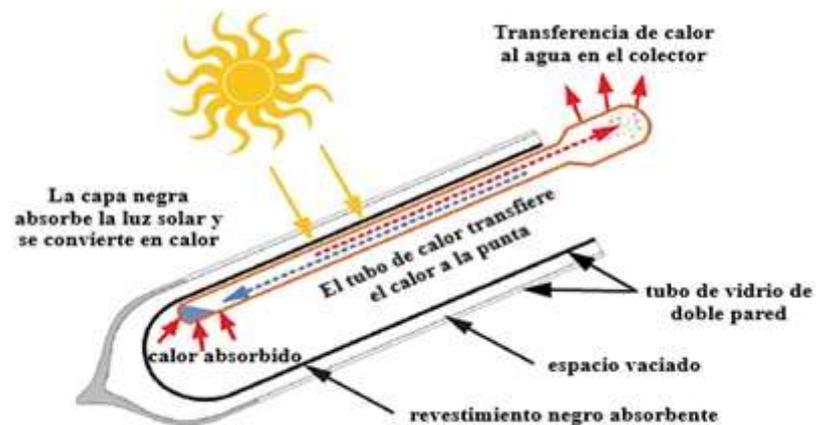
Este tipo de ETC emplea componentes de cambio de fase para transferir el calor con una elevada eficiencia. Se caracteriza por tener un tubo de cobre cerrado (heat pipe)

unido a una aleta generalmente de cobre (placa absorbente) y una punta de metal fusionada al tubo sellado (condensador) colocado en la parte interna del tubo de vacío como se indica en la Figura 21 [7].



**Figura 21.** Colector de tubos de vacío con heat pipe [45].

El heat pipe sellado al vacío se llena con una pequeña cantidad de un fluido que puede ser metanol, agua con aditivos especiales, u otros. Cuando la radiación solar cae sobre la placa absorbente, el líquido dentro del heat pipe se evapora y este vapor se desplaza a la región de disipación de calor, en este lugar el fluido se condensa y desprende su calor latente. El fluido de trabajo condensado regresa al heat pipe y el proceso empieza de nuevo como se observa en la Figura 22.



**Figura 22.** Proceso de evaporación-condensación de un heat pipe [46].

Según Kalogirou [31] establece que una característica única de este tipo de colectores es que no es posible que se produzca la evaporación o condensación por sobre la temperatura de cambio de fase, por lo que el heat pipe ofrece una protección al equipo contra el congelamiento y el sobrecalentamiento.

Si el tubo de vacío se llega a romper o quebrarse, no se requiere desmontar simplemente cambiar el tubo de vacío y colocarlo de nuevo en el interior del heat pipe. Esta flexibilidad que ofrece el ETC lo hace ideal en diseños solares de circuitos cerrados.

### **1.3 Conclusiones del capítulo**

El calentamiento de agua en piscinas ha generado varios estudios ya que existen diversos sistemas que logran este cometido, sin embargo, los que utilizan energía solar brindan varias ventajas sobre los demás, siendo la principal, el hecho de que son amigables con el medio ambiente, característica de principal interés en la actualidad debido al crítico estado del planeta, producto del abuso del consumo de combustibles derivados del petróleo.

También estos sistemas pueden resultar fáciles de instalar, siempre que se tenga el espacio físico necesario para su emplazamiento.

Por último, al hacer un análisis en el tiempo resultan económicos puesto que el sol es una fuente de energía virtualmente inagotable.

## CAPÍTULO II

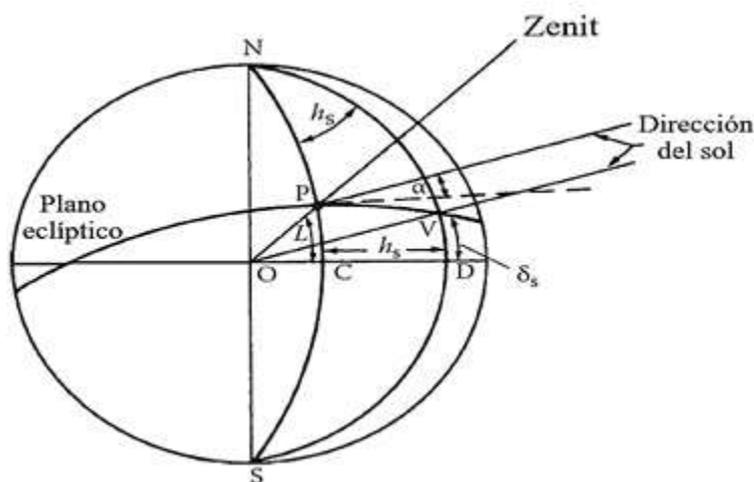
### ESTUDIOS PREVIOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR TUBOS DE VACÍO

En este capítulo se presentan los diferentes parámetros y principios de ingeniería que intervienen durante la captación y transformación de la energía solar en energía térmica para ser utilizada en una de las varias aplicaciones como lo es el calentamiento de agua. Además, se analizará los fenómenos térmicos que ocurren en la piscina los mismos que proporcionaran las relaciones matemáticas y ecuaciones necesarias en el diseño óptimo del sistema de colectores con tubos de vacío.

#### 2.1 Cálculo de los ángulos solares

##### 2.1.1 Declinación solar

La declinación solar ( $\delta_s$ ) se determina como el ángulo entre la línea central de la tierra y el sol, fija la dirección de los rayos directos procedentes del sol y su proyección en el plano ecuatorial, tal como se observa en la Figura 24. Las declinaciones al norte y al sur del ecuador son positivas y negativas respectivamente, es decir, durante el equinoccio de primavera va de  $0^\circ$  a  $+23.45^\circ$  en el solsticio de verano y de  $0^\circ$  durante el equinoccio de otoño a  $-23.45^\circ$  en el solsticio de invierno [31], como se observa en la Figura 23.



**Figura 23.** Ángulo horario (CND), declinación solar (VOD), latitud (POC) [47].

La declinación se mide en grados y se calcula con la Ecuación (1).

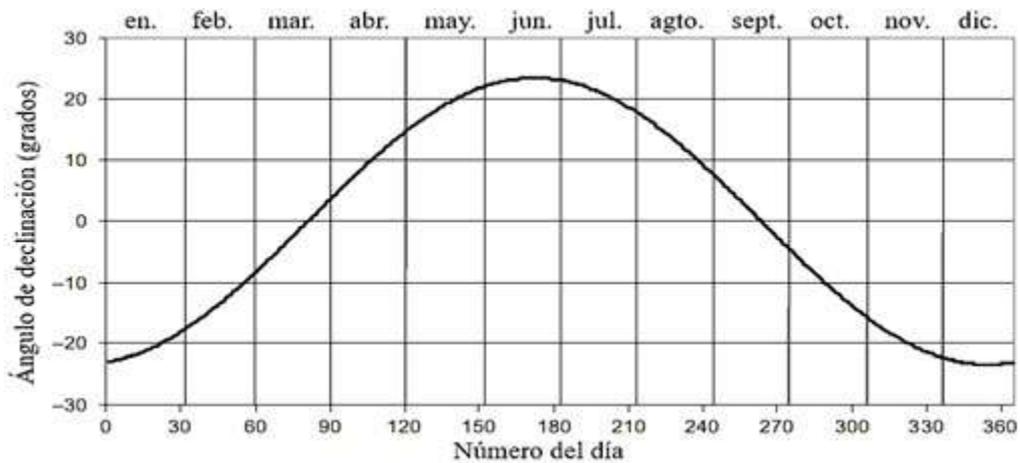
$$\delta_s = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + N}{365}\right) \quad (1)$$

Donde:

$\delta_s$  : declinación solar, [°].

$N$  : Representa cualquier día del año entre el 1 de enero y el 31 de diciembre.

Los valores de la declinación solar durante un día promedio del mes se pueden observar en la Figura 24 y la Tabla 3.



**Figura 24** Declinación del sol [31].

**Tabla 3.** Número de día y número de día promedio recomendado para cada mes [31].

Mes	Número de día	Día promedio del mes	
		Fecha	N
<b>ene.</b>	i	17	17
<b>feb.</b>	31+i	16	47
<b>mar.</b>	59+i	16	75
<b>abr.</b>	90+i	15	105
<b>may.</b>	120+i	15	135
<b>jun.</b>	151+i	11	162
<b>jul.</b>	181+i	17	198
<b>ago.</b>	212+i	16	228
<b>sep.</b>	243+i	15	258
<b>oct.</b>	273+i	15	288
<b>nov.</b>	304+i	14	318
<b>dic.</b>	334+i	10	344

De manera general al realizar los cálculos se toma como referencia el día promedio del mes  $N$ , en caso de requerirse el valor  $N$  de un día cualquiera; ejemplo, 14 de agosto, se debe aplicar la relación de acuerdo con la Tabla 2, es decir en agosto la relación es  $N = 212 + i = 212 + 14 = 226$ , donde  $i$  es la fecha específica del mes.

### 2.1.2 Ángulo horario

El ángulo horario ( $h_s$ ) se define como el desplazamiento angular del sol desde el meridiano local provocado por la rotación de la Tierra alrededor de su propio eje como se observa en la Figura 25. El ángulo horario en el mediodía solar local es  $0^\circ$  con cada  $360^\circ/24$  o de  $15^\circ$  de longitud equivalente a 1 hora [47], en la Tabla 4 se representa los valores del ángulo horario del Hemisferio Norte.

**Tabla 4.** Valor del ángulo horario con la hora del día para el hemisferio norte [47].

Hora del día ( $h_s$ )	6	7	8	9	10	11	12
Ángulo horario ( $^\circ$ )	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
Hora del día ( $h_s$ )	12	13	14	15	16	17	18
Ángulo horario ( $^\circ$ )	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90

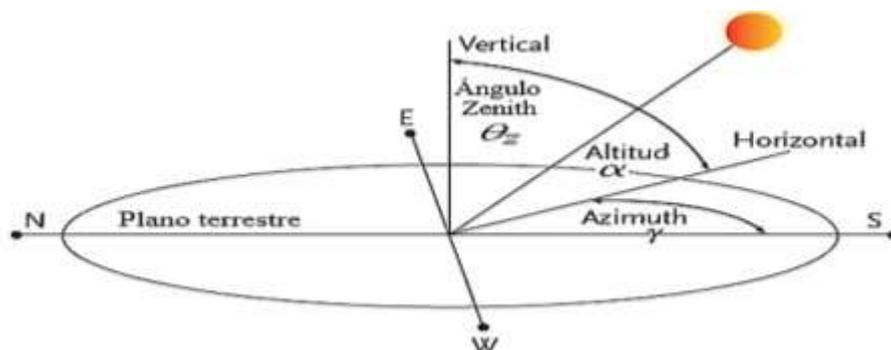
El ángulo horario se mide en grados y calcula con la ecuación (6).

$$h_s = (AST - 12) \cdot 15^\circ \quad (2)$$

Donde:

$h_s$  : ángulo horario, [ $^\circ$ ].

$AST$  : Es la hora solar aparente de 1 a 24 horas.



**Figura 25.** Ángulos: zenit solar ( $\theta_z$ ), altitud solar ( $\alpha$ ), azimut solar ( $\gamma$ ) [48].

### 2.1.3 Ángulo de altitud solar

El ángulo de altitud solar ( $\alpha$ ) es el ángulo comprendido entre un plano horizontal y los rayos del sol como se observa en la Figura 25, además, es el complemento del ángulo zenit solar, se calcula con la ecuación (3) [31]-[47].

$$\sin \alpha = \cos L \cdot \cos \delta_s \cdot \cosh_s + \sin L \cdot \sin \delta_s \quad (3)$$

Donde:

$L$ : Es la latitud local, definida como el ángulo entre una línea desde el centro de la tierra hasta el sitio de interés y el plano ecuatorial. Los valores al norte y al sur de la línea ecuatorial son positivos y negativos respectivamente [31].

$\alpha$ : ángulo de altitud solar, [°].

$h_s$ : Ángulo horario, [°].

$\delta_s$ : Ángulo de declinación solar, [°].

### 2.1.4 Ángulo zenit solar

El ángulo zenit solar ( $\theta_z$ ) representa el ángulo entre la vertical y la línea del sol como se muestra en la Figura 25, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación de los rayos en una superficie horizontal [49]. Al calcular este valor se deben emplear las ecuaciones (4) - (5).

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (4)$$

Donde:

$\theta_z$ : ángulo zenit solar, [°].

$\alpha$ : Ángulo de altitud solar, [°].

Y con relación a la ecuación (5) se tiene que:

$$\sin \alpha = \cos \theta_z = \cos L \cdot \cos \delta_s \cdot \cosh_s + \sin L \cdot \sin \delta_s \quad (5)$$

Donde:

$L$  : es la latitud local.

$\alpha$  : Ángulo de altitud solar, [°].

$h_s$  : Ángulo horario, [°].

$\delta_s$  : Ángulo de declinación solar, [°].

El ángulo de altitud solar es 0° durante la salida y la puesta del sol, por lo que el ángulo de la hora de puesta del sol  $h_{ss}$  se puede calcular con la ecuación (6).

$$\cosh_{ss} = -\frac{\sin L \cdot \sin \delta_s}{\cos L \cdot \cos \delta_s} = -\tan L \cdot \tan \delta_s \quad (6)$$

### 2.1.5 Ángulo azimut solar

El ángulo azimut solar ( $\gamma$ ) se forma debido a la proyección de los rayos solares en el plano horizontal y la línea que va en dirección sur como se representa en la Figura 25, los desplazamientos al este del sur son negativos y el oeste del sur son positivos [47] - [49]. Se calcula mediante la ecuación (7).

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta_s \cdot \sin h_s}{\cos \alpha} \quad (7)$$

Donde:

$\alpha$  : Ángulo de altitud solar, [°].

$h_s$  : Ángulo horario, [°].

$\delta_s$  : Ángulo de declinación solar, [°].

### 2.1.6 Número de horas luz del día o longitud del día

El número de horas de luz del día viene dado por la ecuación (8).

(8)

$$ld = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1} [-\tan(L) \cdot \tan(\delta_s)]$$

Donde:

$ld$ : longitud del día en horas, [horas]

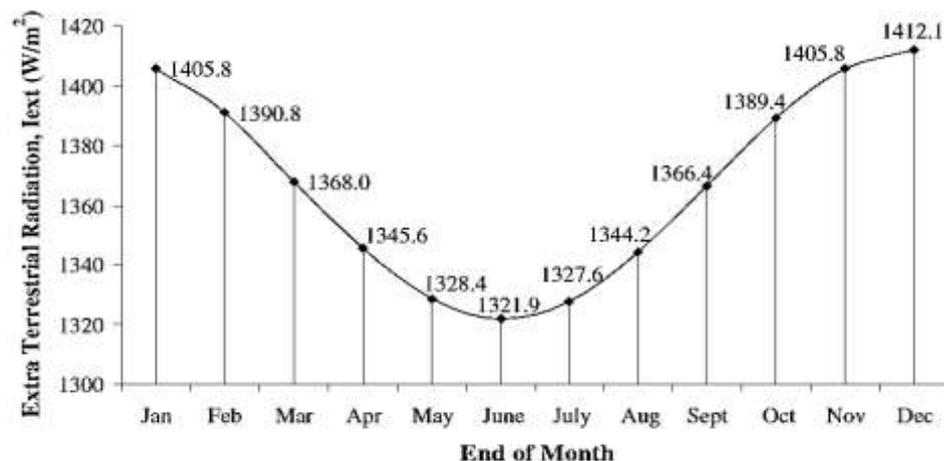
$L$ : latitud del lugar.

$\delta_s$ : Ángulo de declinación solar, [°].

Ecuador al estar atravesado por la línea equinoccial posee poca variabilidad en la posición del sol durante todo el año, lo cual favorece la aplicación de la energía solar para producir electricidad y calor, ya que en promedio hay 12 horas de sol durante el día [50].

## 2.2 Radiación solar

Radiación solar extraterrestre: El planeta Tierra posee una órbita elíptica alrededor del sol y es debido a esto que la distancia que lo separa del el varia durante todo el año, por ello la NASA (National Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés) a medido la intensidad solar en la región extraterrestre de todo el planeta, con la ayuda de sus potentes satélites dispuestos alrededor del mundo, con ello se tiene que durante los meses del año, la radiación extraterrestre medida en el plano normal a la radiación del día N del año varía como se indica en la Figura 26, y puede ser calculada con la ecuación (12) según Tiwari et. al [47].



**Figura 26.** Variación de la radiación extraterrestre durante los meses del año [47].

$$G_{ext} = G_{sc} \left( 1.0 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot N}{365} \right) \quad (9)$$

Donde:

$G_{ext}$  : Radiación solar extraterrestre; [W/m<sup>2</sup>].

$G_{sc}$  : Constante solar; [W/m<sup>2</sup>].

$N$  : día del año; (1 a 365).

La magnitud de la energía solar por unidad de área que llega a la superficie exterior de la atmósfera de la Tierra se conoce como la constante solar  $G_{sc}$  y su valor medio más aceptado es 1367 W/m<sup>2</sup>. Durante el transcurso del año (y de año en año) la constante solar varía ligeramente (~7%) producto del cambio de la distancia entre el sol y la Tierra a lo largo de la órbita terrestre y de los ciclos solares [51].

Para calcular la radiación solar diaria media mensual sobre una superficie horizontal en la región extraterrestre se utiliza la ecuación (10) [52].

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{ext} \cdot \left[ \cos L \cdot \cos \delta_s \cdot \sinh_{ss} + \frac{\pi \cdot h_{ss}}{180} \sin L \cdot \sin \delta_s \right] \quad (10)$$

Donde:

$G_{ext}$  : radiación solar extraterrestre; [W/m<sup>2</sup>].

$L$  : es la latitud local; [°].

$h_{ss}$  : ángulo de la puesta del sol; [°].

$\delta_s$  : ángulo de declinación solar; [°].

### 2.3 Radiación diaria sobre una superficie horizontal

En diferentes aplicaciones es necesario conocer del promedio mensual de la radiación solar diaria  $\bar{H}$  expresada en [MJ/ m<sup>2</sup>] disponible en una superficie horizontal. Según Tiwari et. al [47] se puede calcular con una precisión del 10 % utilizando la siguiente correlación (11):

$$\bar{H} = a + b \cdot \left( \frac{n}{ld} \right) \cdot \bar{H}_o \quad (11)$$

Donde:

$\bar{H}$  : promedio mensual de la radiación solar diaria, [MJ/ m<sup>2</sup>].

$n$  y  $ld$ : son el promedio mensual observado de horas de sol brillantes diarias y la duración total del día promedio del mes.

En Ecuador, según Martínez y Asitimbay el valor de hora solar pico  $HSP$  se encuentre entre 2.2 y 5.2 horas reales donde se puede aprovechar al máximo el recurso solar [53].

Los coeficientes de regresión  $a$  y  $b$  están dados por:

$$a = -0.309 + 0.539 \cdot \cos L - 0.0693 \cdot E_o + 0.290 \cdot \frac{n}{ld}$$

Y,

$$b = 1.527 - 1.027 \cdot \cos L - 0.0926 \cdot E_o - 0.359 \cdot \frac{n}{ld}$$

Donde:

$L$  : es la latitud local; [°].

$E_o$  : Altura sobre el nivel del mar, [Km].

El índice de claridad media mensual  $\bar{K}_T$  se obtiene con la ecuación (12) [52]:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (12)$$

Donde:

$\bar{H}$  : la radiación diaria media mensual en una superficie horizontal, [MJ/ m<sup>2</sup>].

$\bar{H}_o$  : la radiación extraterrestre diaria media mensual superficie horizontal, [MJ/ m<sup>2</sup>].

Al estimar la media mensual de irradiación solar difusa diaria sobre una superficie horizontal según Yahyaoui [52] se tiene la ecuación (13).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.39 - 4.027 \cdot \bar{K}_T + 5.531 \cdot \bar{K}_T^2 - 3.108 \cdot \bar{K}_T^3 \quad (13)$$

Donde:

$\bar{H}_d$ : promedio mensual diario de la radiación difusa incidente sobre una superficie horizontal, [MJ/ m<sup>2</sup>].

$\bar{H}$ : radiación diaria media mensual en una superficie horizontal, [MJ/ m<sup>2</sup>].

Al estimar la media mensual de irradiación solar directa diaria sobre una superficie horizontal se tiene la ecuación (14).

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (14)$$

#### 2.4 Media mensual de irradiación total diaria en superficies con inclinación.

De manera general los colectores no se instalan en forma horizontal o vertical, sino con un ángulo para incrementar la cantidad de radiación captada y disminuir en otras las pérdidas por reflexión. Los valores acerca de la radiación solar sobre áreas inclinadas se obtienen a partir de los datos existentes ya sea de incidencia normal o para superficies horizontales por lo que es necesario convertir esos datos en radiación sobre superficies inclinadas [31].

En cualquier superficie inclinada, hay tres tipos de radiación solar: directa, difusa, y radiación solar reflejada de una superficie horizontal. El factor de conversión de la radiación directa  $\bar{R}_b$  se define como la proporción de la radiación del rayo que incide en una superficie inclinada a la de una superficie horizontal como se indica en la ecuación (15).

$$\bar{R}_b = \frac{h_{ss} \cdot \sin(\delta_s) \cdot \sin(L - \beta) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(L - \beta) \cdot \sin(h_{ss})}{h_{ss} \cdot \sin(\delta_s) \cdot \sin(L) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(L) \cdot \sin(h_{ss})} \quad (15)$$

Donde:

$L$  : es la latitud local; [ $^{\circ}$ ].

$h_{ss}$  : ángulo de la puesta del sol; [ $^{\circ}$ ].

$\delta_s$  : ángulo de declinación solar; [ $^{\circ}$ ].

$\beta = 20^{\circ}$ , en éste cálculo se toma en cuenta un valor del ángulo de inclinación  $\beta$  entre  $10^{\circ}$  y  $25^{\circ}$  según la Norma Ecuatoriana de la Construcción [54].

Para el dato de  $h_{ss}$  se toma el valor mínimo dependiendo del resultado según las siguientes correlaciones:

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan L \cdot \tan \delta_s)$$

Y,

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(L - \beta) \cdot \tan \delta_s)$$

El factor de la radiación difusa  $\bar{R}_d$  que es la relación entre la radiación difusa que incide en una superficie inclinada y la que incide en una superficie horizontal hay que tener en cuenta que la falta de cualquier método establecido para encontrar la distribución de radiación difusa sobre el cielo hace que su estimación sea muy difícil. Sin embargo, Tiwari et al. [47] propone utilizar la ecuación (16):

$$\bar{R}_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (16)$$

Donde:

$\beta$  : es el ángulo de inclinación solar del colector.

La radiación solar reflejada corresponde a las radiaciones reflejadas desde el suelo y otros objetos cercanos a la superficie de interés, el factor de conversión para la radiación solar reflejada  $\bar{R}_r$  está dado por la ecuación (17):

$$\bar{R}_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot \rho \quad (17)$$

Donde:

$\beta$  : es el ángulo de inclinación solar del colector.

$\rho$  : es el coeficiente de reflexión o albedo que es de 0,2 para el suelo ordinario.

Finalmente, de acuerdo con Kalogirou [31], la radiación solar total sobre una superficie inclinada está dada por la ecuación (18).

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \rho \quad (18)$$

Donde:

$\beta$  : es el ángulo de inclinación solar del colector.

$\bar{R}_b$  : El factor de conversión de la radiación directa.

## 2.5 Análisis termodinámico del colector con tubos de vacío

El calor útil  $Q_u$  se define como la diferencia entre el calor incidente  $Q_{inc}$  el cual llega a través de la radiación solar y el calor de las pérdidas  $Q_{per}$  que se originan durante el proceso de transferencia de calor y se calcula a partir de la ecuación (19) [55].

$$Q_u = Q_{inc} - Q_{per} \quad (19)$$

Donde:

$Q_u$  : Calor útil; [W/m<sup>2</sup>].

$Q_{inc}$  : Calor incidente; [W/m<sup>2</sup>].

$Q_{per}$  : Pérdidas de calor; [W/m<sup>2</sup>].

Al calcular la eficiencia  $n$  de los colectores solares se utiliza la ecuación (20).

$$n = \frac{Q_u}{Q_{inc}} \quad (20)$$

El calor incidente medido en vatios se lo obtiene mediante la ecuación (21) [55].

$$Q_{inc} = I_p \cdot \alpha_s \cdot A \quad (21)$$

Donde:

$I_p$  : irradiación promedio en la ciudad de Quito; [W/m<sup>2</sup>].

$A$  : Área de captación de la radiación por el número de tubos de vacío; [m<sup>2</sup>].

$\alpha_s$  : Factor de corrección de la radiación incidente que llega a los tubos de vacío.

El factor de corrección se determina con la ecuación (22).

$$\alpha_s = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (a - \alpha) \cdot \rho_d} \quad (22)$$

Donde:

$\tau$  : Transmisividad de los tubos de vidrio; [W/m<sup>2</sup>·K].

$\alpha$  : Absortividad de los tubos; [adimensional].

$\rho_d$  : Reflectancia difusa de los tubos.

Hay que tener en cuenta que independientemente de la posición del sol, solamente se ve afectado la mitad del área total de los tubos de vacío, por lo que es conveniente tomar la mitad del perímetro total como se indica en la ecuación (23) [55].

$$A = \frac{d_i \cdot \pi \cdot \#tubos}{2} \quad (23)$$

Donde:

$d_i$  : Diámetro interno del tubo; [m<sup>2</sup>].

Las pérdidas de calor en los tubos evacuados se originan exclusivamente por radiación y se calcula mediante la ecuación (24).

$$Q_{p-tubos} = U_{lr} \cdot A \cdot (T_c - T_a) \quad (24)$$

Donde:

$U_{lr}$ : coeficiente de pérdidas de calor por radiación en los tubos de vacío; [W/m<sup>2</sup>·K].

$A$ : área de captación de los tubos de vacío; [m<sup>2</sup>]

$T_c$ : temperatura del tubo exterior; [K].

$T_a$ : temperatura ambiente; [K].

El valor del coeficiente de pérdidas de calor por radiación se estima mediante la ecuación (25) que relaciona las pérdidas por radiación de la parte interna hacia la parte externa del tubo de vacío, y de la parte externa del tubo de vacío hacia el medio ambiente [55].

$$U_{lr} = \left[ \frac{A_r}{h_w + h_{r,c-a} \cdot A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (25)$$

Donde:

$A_r$ : Área del tubo interior; [m<sup>2</sup>].

$A_c$ : Área del tubo exterior; [m<sup>2</sup>].

$h_w$ : Coeficiente de convección en función del viento; [W/m<sup>2</sup>·K].

$h_{r,r-c}$ : Pérdidas por radiación desde la superficie interna hacia la externa del tubo medida en; [W/m<sup>2</sup>·K].

$h_{r,c-a}$ : Pérdidas por radiación desde el tubo interno hacia el tubo externo; [W/m<sup>2</sup>·K].

El coeficiente de convección se calcula mediante la ecuación (26).

$$h_w = N_u \cdot \frac{K}{D} \quad (26)$$

Donde:

$N_u$  : # de Nusselt; [Adimensional].

$D$  : Diámetro del tubo de vidrio; [m].

$K$  : Coeficiente de conductividad térmica; [W/m·K].

Entre la superficie interna y externa del tubo el coeficiente de transferencia de calor no se ve afectado por el vacío que existe un espacio entre estos dos tubos, y su valor se calcula mediante la ecuación (27).

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma \cdot (T_r^2 + T_c^2) \cdot (T_r + T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2 \cdot A_r}{\varepsilon_2 \cdot A_c}} \quad (27)$$

Donde:

$\sigma$  : Cte. de Stefan-Boltzmann; [W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>].

$\varepsilon_1$  : Emisividad del tubo interno; [adimensional].

$\varepsilon_2$  : Emisividad del tubo externo; [adimensional].

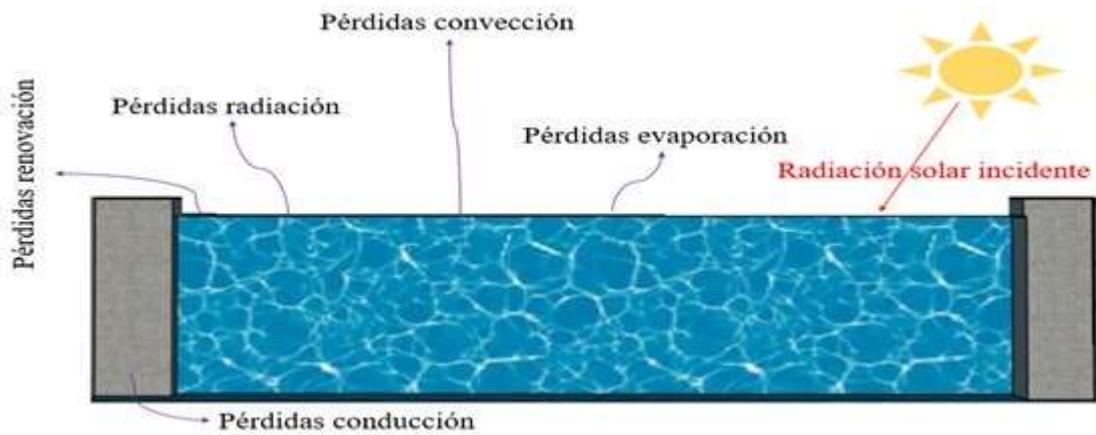
$F_{12}$  : Factor de visión

$T_c$  : Temperatura tubo exterior; [K].

$T_r$  : Temperatura tubo interior; [K].

## 2.6 Balance de energía en la piscina

Al efectuar el análisis y diseño del sistema, es necesario hacer un balance de energía en la piscina, debido a que en ella interactúan distintos sistemas de transferencia de calor, varios son de ganancia, mientras que algunos son de pérdida [56], en la Figura 27 se indica de manera gráfica, la interacción de estos sistemas en la transferencia de calor.



**Figura 27.** Esquema de energías que actúan en la piscina. Elaborado por Carvajal & Mejía.

La energía demandada para elevar la temperatura de la piscina se encuentra al realizar el balance energético que muestra la expresión (28):

$$\dot{E} = \dot{E}_{sale} - \dot{E}_{entra} \quad (28)$$

Donde:

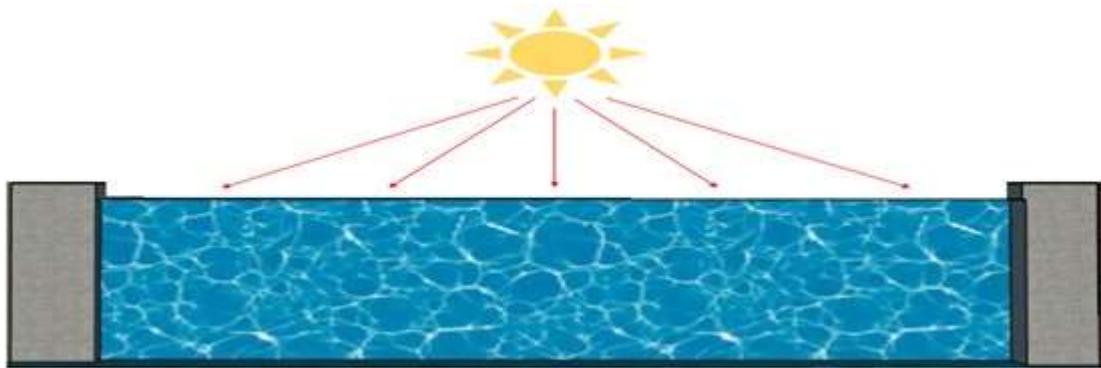
$\dot{E}$  : Pérdidas totales de energía en; [W].

$\dot{E}_{entra}$  : Energía que entra al sistema en; [W].

$\dot{E}_{sale}$  : Energía que sale del sistema en; [W].

### 2.6.1 Energía que entra a la piscina

Determinar la ganancia de calor, como mencionan Hincapié et al. [57] se relaciona con la absorción de radiación solar que ocurre en la piscina, debido a su exposición directa a la radiación solar, como se muestra en la Figura 28, es importante mencionar que la proporción de energía que pueda captar está directamente relacionada con el coeficiente de absorción que posea el agua del sistema.



**Figura 28.** Radiación solar. Elaborado por Carvajal & Mejía.

La ecuación (29) indica la expresión para calcular dicha ganancia.

$$\dot{E}_{entra} = I \cdot \alpha \cdot A_s \quad (29)$$

Donde:

$I$  : Radiación solar incidente en [W/m<sup>2</sup>].

$\alpha$  : Coeficiente de absorción del fluido.

$A_s$  : Área de la superficie de la piscina [m<sup>2</sup>].

### 2.6.2 Energía que abandona la piscina

Se deben considerar fundamentalmente cinco tipos de pérdidas, las mismas que figuran en la ecuación (30).

$$\dot{E}_{sale} = \dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{re} \quad (30)$$

Donde:

$\dot{Q}_{ev}$  : Pérdidas generadas por evaporación en [W].

$\dot{Q}_r$  : Pérdidas generadas por radiación en [W].

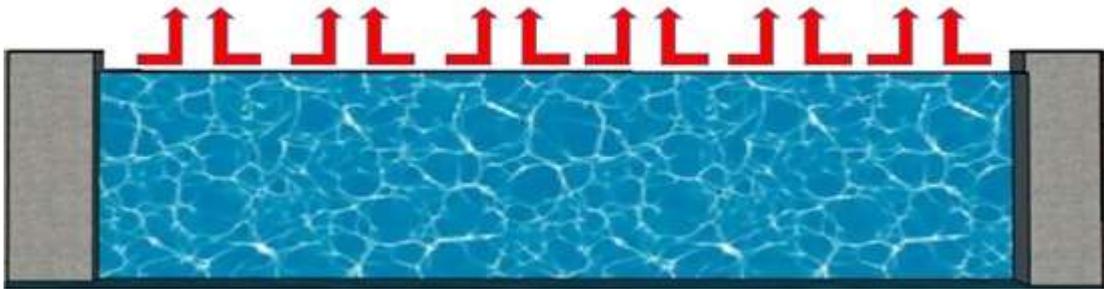
$\dot{Q}_{conv}$  : Pérdidas generadas por convección en [W].

$\dot{Q}_{cond}$  : Pérdidas generadas por conducción en [W].

$\dot{Q}_{re}$  : Pérdidas generadas por renovación en [W].

### 2.6.3 Pérdidas generadas por convección

Son pérdidas originadas producto del desplazamiento del aire que circula en los alrededores de la piscina y que atraviesa el área superior de la misma, esto produce una salida de calor de la superficie, lo que deriva en la disminución de temperatura de la piscina. Seguido de esto el aire caliente se eleva y se reemplaza por aire frío, ocasionando un ciclo de pérdida continuo ya que este aire frío extrae nuevamente calor de la superficie [57]. En la Figura 29 se indica la representación gráfica de este fenómeno.



**Figura 29.** Pérdidas por convección. Elaborado por Carvajal & Mejía.

La ecuación (31), muestra cómo se calculan estas pérdidas.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (31)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de convección en; [W/m<sup>2</sup>K].

$T_s$ : Temperatura superficial del agua en; [K].

$T_\infty$ : Temperatura de la masa de aire en el ambiente en; [K].

El coeficiente de convección está definido por la relación (32).

$$h = \frac{k \cdot Nu}{L_c} \quad (32)$$

Donde:

$k$ : Coeficiente conductivo del aire en; [W/m·K].

$Nu$ : # de Nusselt.

$L_c$ : Longitud característica en; [m].

El cálculo de la longitud característica de superficies horizontales se realiza con la ecuación (33).

$$L_c = \frac{As}{P} \quad (33)$$

Donde:

$P$ : Perímetro piscina en; [m].

El valor de Nusselt se relaciona con el cambio de temperatura, características termo físicas del fluido y la ecuación de Rayleigh, que a su vez es la solución de la multiplicación de Grashof y de Prandtl [58]. Por lo tanto, se obtienen de las siguientes correlaciones:

La ecuación (34) determina el número de Nusselt en un intervalo entre,  $10^4 < Ra < 10^7$

$$Nu = 0.54 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (34)$$

La ecuación (35) determina el número de Nusselt en un intervalo entre,  $10^7 < Ra < 10^{11}$

$$Nu = 0.15 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

Donde:

$Ra$ : Número de Rayleigh.

Mientras que el número de Rayleigh está definido por la ecuación (36).

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (36)$$

Donde:

$Gr$ : Número de Grashof.

$Pr$ : Número de Prandtl.

$g$ : Cte. gravedad en  $[m/s^2]$ .

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica en  $[K^{-1}]$ .

$\nu$ : Valor de viscosidad cinemática en  $[m^2/s]$ .

El coeficiente de expansión volumétrica se calcula con la ecuación (37).

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (37)$$

Donde:

$T_f$ : Temperatura de película en  $[K]$ .

La temperatura de película se calcula con la ecuación (38).

$$T_f = \frac{(T_s - T_\infty)}{2} \quad (38)$$

El cálculo la temperatura de película  $T_f$  servirá con el fin de obtener los coeficientes necesarios para desarrollar los pasos indicados anteriormente; sin embargo, algunos de los valores obtenidos en base a la  $T_f$  deben ser corregidos en función de la presión que exista en el lugar de estudio, ya que en la mayor parte de bibliografía las propiedades del aire se detallan a 1 atm, la misma que es una presión genérica para realizar cálculos [58].

#### **2.6.4 Pérdidas por evaporación**

Son pérdidas ocasionadas por una transformación física, las moléculas de agua ubicadas en la parte superior de la piscina consiguen suficiente energía para cambiar su estado, de líquido a gaseoso, como se indica en la Figura 31. Para que este cambio ocurra, estas moléculas captan del sistema energía en forma de calor latente de evaporación, lo que ocasiona una disminución de su energía y por ende su temperatura.

La humedad relativa del ambiente también genera cambios en este tipo de pérdidas, ya que estas serán mayores cuando la humedad relativa de los alrededores sea menor [57].



**Figura 30.** Pérdidas por evaporación. Elaborado por Carvajal & Mejía.

El cálculo de las pérdidas de calor por evaporación se realiza con la ecuación (39).

$$\dot{Q} = m_v \cdot h_{fg} \quad (39)$$

Donde:

$m_v$  : Gasto por evaporación en (kg/s).

$h_{fg}$  : Calor latente de vaporización del agua en (kJ/kg).

Con la ecuación (40), se puede determinar la razón de evaporación.

$$m_v = h_{masa} \cdot A_s \cdot (\rho_{vs} - \rho_{v\infty}) \quad (40)$$

Donde:

$h_{masa}$  : Coeficiente de transferencia de masa en [m/s].

$\rho_{vs}$  : Densidad de vapor en la superficie del agua en [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_{v\infty}$  : Densidad de vapor lejos de la superficie del agua en [kg/m<sup>3</sup>].

Al evaluar el coeficiente de transferencia de masa se utiliza la ecuación (41).

$$h_{masa} = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{Lc} \quad (41)$$

Donde:

$Sh$ : # de Sherwood.

$D_{AB}$ : Difusividad de masa del vapor de agua en el aire en [m<sup>2</sup>/s].

$Lc$ : Longitud característica horizontal de la superficie en [m].

Al obtener la difusividad de masa del vapor de agua se utiliza la ecuación (42).

$$D_{AB} = D_{H_2O-AIRE} = 1,78 \times 10^{-10} \cdot \frac{Tf^{2,072}}{Pat} \quad (42)$$

Donde:

Presión atmosférica en [atm].

Se debe tener claro que, en la transferencia de masa, el número de Sherwood desempeña el papel que el número de Nusselt tiene en la transferencia de calor [58], así se tienen las siguientes correlaciones para las superficies superiores de placa horizontal:

Cuando el resultado del número de Grashof por el número de Schmidt es del orden  $10^4 < Gr \cdot Sc < 10^7$ , el número de Sherwood es obtenido por la igualdad (43).

$$Sh = 0,54 \cdot (Gr \cdot Sc)^{\frac{1}{4}} \quad (43)$$

Y si  $10^7 < Gr \cdot Sc < 10^{11}$ , se determina el número de Sherwood con la ecuación (44).

$$Sh = 0,15 \cdot (Gr \cdot Sc)^{\frac{1}{3}} \quad (44)$$

Donde:

$Gr$ : Número de Grashof.

$Sc$ : Número de Schmidt.

Al determinar Grashof su ecuación general indica que se deben ocupar los cambios de temperaturas, por ello no se adecua a este caso de transferencia de calor y difusión de masa, es por tal motivo que, para este preciso análisis, esta ecuación incorpora la difusividad de vapor y la variación de densidades. Tal y como se muestra en la ecuación (45).

$$Gr = \frac{g \cdot (\rho_{\infty} - \rho_s) \cdot Lc^3}{(\rho_{\infty} + \rho_s) \cdot \nu^2} \quad (45)$$

Donde:

$\rho_{\infty}$ : Densidad apartada de la superficie [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$\rho_s$ : Densidad en la superficie de la piscina [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Para obtener los valores necesarios que se requieren al calcular el número de Grashof, se utiliza desde la ecuación (46), hasta la (52).

$$\rho_{\infty} = \rho_{a\infty} + \rho_{v\infty} \quad (46)$$

$$\rho_{v\infty} = \frac{P_{v\infty}}{R_v \cdot T_{\infty}} \quad (47)$$

$$\rho_{a\infty} = \frac{Pat - P_{v\infty}}{R_a \cdot T_{\infty}} \quad (48)$$

$$P_{v\infty} = \phi \cdot P_{sat \partial T_{\infty}} \quad (49)$$

$$\rho_s = \rho_{as} + \rho_{vs} \quad (50)$$

$$\rho_{vs} = \frac{P_{vs}}{R_v \cdot T_s} \quad (51)$$

$$\rho_{as} = \frac{Pat - P_{vs}}{R_a \cdot T_s} \quad (52)$$

Donde:

$\rho_{a\infty}$  : Densidad del aire seco lejos de la superficie en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

$R_v$  : Cte. gas vapor en  $[\text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}]$ .

$\rho_{as}$  : Densidad del aire seco en la superficie en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

$P_{v\infty}$  : Presión de vaporización apartada de la superficie en  $[\text{kPa}]$ .

$\phi$  : Humedad relativa.

$R_a$  : Cte. gas aire en  $[\text{kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}]$ .

$P_{at}$  : Presión atmosférica en  $[\text{kPa}]$ .

$P_{vs}$  : Presión vaporización en la superficie  $[\text{kPa}]$ .

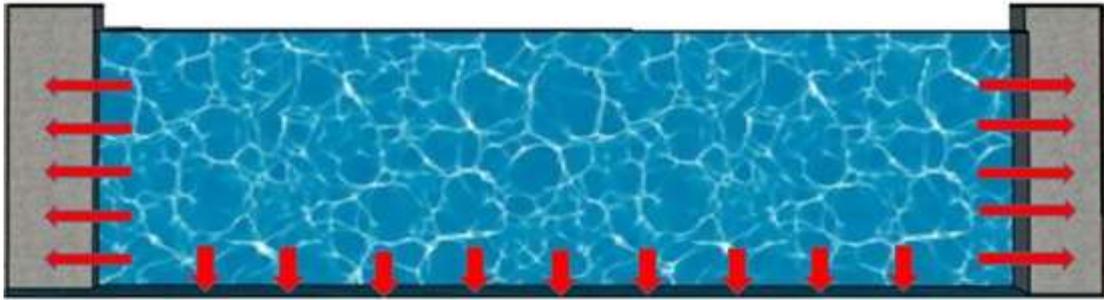
$P_{sat@T\infty}$  : Presión saturación a la temperatura del ambiente en  $[\text{kPa}]$ .

Al calcular el número de Schmidt con la ecuación (53), se tendrán todos los datos para obtener la pérdida de calor por evaporación.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (53)$$

### 2.6.5 Pérdidas por conducción

Son pérdidas que se producen por la conducción térmica existente entre las paredes y el piso de la piscina con el agua de esta, puesto que existe una diferencia de temperaturas entre estos elementos, esto implica que, al tener dos elementos que se encuentran en contacto y poseen diferentes temperaturas, el de mayor temperatura cederá energía al elemento con temperatura menor, buscando lograr el equilibrio térmico. Esto se muestra en la Figura 31. El tipo de materiales y diseño arquitectónico propios de la piscina afectan directamente a este tipo de pérdidas de calor ya que cada material tiene sus respectivas propiedades térmicas [57].



**Figura 31.** Pérdidas por conducción. Elaborado por Carvajal & Mejía.

Este tipo de pérdidas de calor por conducción son calculadas con la ecuación (54).

$$\dot{Q}_{cond} = \left( \frac{T_s - T_1}{RT} \right) \quad (54)$$

Donde:

$T_s$  : Temperatura del agua en [°C].

$T_1$  : Temperatura de los cerramientos en [°C].

$RT$  : Resistencia total por conducción en [K/W].

La resistencia total por conducción se utiliza la ecuación (55), el valor de la resistencia al contacto térmico depende de la rugosidad de las superficies y las propiedades de cada material [58].

$$RT = \frac{L_1}{k_1 \cdot Asp} + \frac{L_2}{k_2 \cdot Asp} \quad (55)$$

Donde:

$k_1$  : Coeficiente de conducción baldosa en [W/m·K].

$k_2$  : Coeficiente de conducción ladrillo en [W/m·K].

$Asp$  : Área de piso y paredes en [m<sup>2</sup>].

$L_1$  : Espesor de la baldosa en [m].

$L_2$  : Espesor del ladrillo en [m].

### 2.6.6 Pérdidas por renovación

Se refieren a la porción de agua que se tiene que volver a colocar en la piscina por la salida de masa de esta, producto de otro tipo de pérdidas, siendo la evaporación la principal. Por lo general, el agua que es repuesta proviene de la red de distribución y normalmente se encuentra a menor temperatura que el resto de la piscina. Esto provoca que se busque alcanzar el equilibrio térmico y exista una pérdida de calor [57]. La expresión que permite obtener el valor de las pérdidas por renovación está dada por la ecuación (56).

$$\dot{Q}_{re} = m_v \cdot c_p \cdot (T_s - T_{ain}) \quad (56)$$

Donde:

$m_v$  : Transferencia de masa por evaporación en [kg/s].

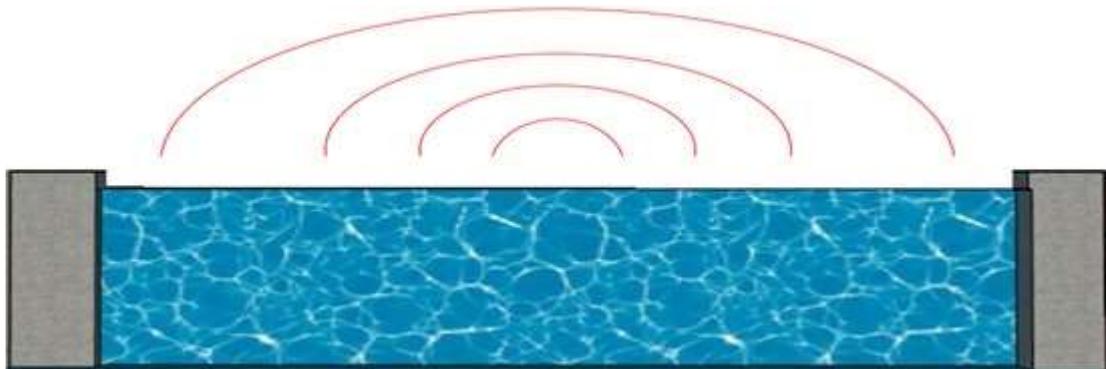
$c_p$  : Calor específico del agua en [kJ/kg·K].

$T_s$  : Temperatura de la piscina en [°C].

$T_{ain}$  : Temperatura del agua en la red de servicio en [°C].

### 2.6.7 Pérdidas por radiación

Son pérdidas relacionadas con la emisividad relativa y las temperaturas del agua y del medio ambiente que la rodea. Todo cuerpo que posea a una temperatura mayor al cero absoluto (0 K) desprende radiación, por tal motivo la piscina también desprende radiación térmica como se indica en la Figura 32. La ley de Stefan-Boltzmann es indispensable para calcular este tipo de pérdidas [59].



**Figura 32.** Pérdidas por radiación.

La ecuación (57) muestra cómo se calculan estas pérdidas.

$$\dot{Q}_r = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (57)$$

Donde:

$\varepsilon_p$  : Emisividad del agua de la piscina.

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann en  $[\text{W}^2/\text{m} \cdot \text{K}^4]$ .

$A_p$  : Área de la piscina en  $[\text{m}^2]$ .

$T_s$  : Temperatura de la piscina en  $[\text{K}]$ .

$T_\infty$  : Temperatura ambiente en  $[\text{K}]$ .

## 2.7 Conclusiones del capítulo

El determinar mediante una exhaustiva investigación las fórmulas necesarias en el cálculo del requerimiento energético para el calentamiento del agua de una piscina, es fundamental para realizar un estudio que aporte información real y precisa.

La transferencia de calor, geometría y ubicación de la piscina, permiten obtener relaciones y ecuaciones matemáticas que posteriormente se utilizaran para desarrollar un diseño apropiado de un sistema de colectores solares con tubos de vacío.

Las fórmulas presentadas en este capítulo pretenden garantizar un diseño adecuado del sistema y una operación exitosa del mismo, para una futura implementación.

### CAPÍTULO III

## RADIACIÓN SOLAR APORTADA Y DEMANDA ENERGÉTICA DE LA PISCINA

En el presente capítulo se realizará los cálculos correspondientes del balance de energía en la piscina, análisis termodinámico y diseño del colector solar en base de la teoría referenciada en el capítulo anterior, también se muestran los datos recolectados durante el estudio y funcionamiento del equipo de calentamiento de agua.

Debido a que la ubicación geográfica se encuentra alejada de las principales estaciones meteorológicas es necesario calcular los valores de la radiación utilizando las ecuaciones presentadas en el capítulo II. Para validar los datos calculados se toma como referencia los datos meteorológicos entregados por el software RETScreen.

### 3.1 Cálculo de los ángulos solares.

El lugar geográfico donde se va a ubicar el conjunto de colectores con tubos de vacío está ubicado en la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, Parroquia Amaguaña en las instalaciones del Club Castillo de Amaguaña, cuyas coordenadas geográficas son: latitud  $-0.389778$  y longitud  $-78.512294$  con una elevación de 2671 msnm.

Se procede a calcular los valores promedios desde enero hasta diciembre de acuerdo con la Tabla 3. El ángulo de declinación se calcula reemplazando  $N$  en la ecuación (1):

$$\delta_s = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + N}{365}\right)$$

$$\delta_s = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + 17}{365}\right)$$

$$\delta_s = -20.92^\circ$$

El ángulo de altitud solar se calcula con la ecuación (3) donde  $L$  es la latitud de la ubicación geográfica y el ángulo horario para el medio día es cero de acuerdo con la Tabla 3, reemplazado los términos en la ecuación se tiene:

$$\sin \alpha = \cos L \cdot \cos \delta_s \cdot \cos h_s + \sin L \cdot \sin \delta_s$$

$$\sin \alpha = \cos(-0.38977) \cdot \cos(-3.41) \cdot \cos(0) + \sin(-0.38977) \cdot \sin(-20.92)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(0.9365)$$

$$\alpha = 69.47^\circ$$

El ángulo zenit se calcula mediante la ecuación (4) reemplazando el valor de  $\alpha$ , haciendo referencia a que el ángulo de incidencia y el ángulo zenit son los mismos en un plano horizontal.

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

$$\theta_z = 90^\circ - 69.47^\circ$$

$$\theta_z = 20.53^\circ$$

Al mediodía solar el sol está exactamente en el meridiano que contiene la línea norte-sur, por lo que el ángulo azimut solar es  $0^\circ$  [31].

El ángulo de la hora del atardece  $h_{ss}$  se calcula reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (6):

$$\cos h_{ss} = -\frac{\sin L \cdot \sin \delta_s}{\cos L \cdot \cos \delta_s} = -\tan L \cdot \tan \delta_s$$

$$\cos h_{ss} = -\tan L \cdot \tan \delta_s$$

$$\cos h_{ss} = -\tan(-0.389778) \cdot \tan(-20.92)$$

$$h_{ss} = \cos^{-1} - 2.599 \times 10^{-3}$$

$$h_{ss} = 90.15^\circ$$

El ángulo azimut se obtiene al reemplazar los valores de  $\delta_s$ ,  $h_s = 0^\circ$  (medio día), y  $\alpha$  en la ecuación (7).

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta_s \cdot \sin h_s}{\cos \alpha}$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos(-20.92) \cdot \sin(0)}{\cos(69.47)}$$

$$\gamma = 0^\circ$$

La duración del día  $ld$  se calcula en horas utilizando la ecuación (8):

$$ld = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}[-\tan(L) \cdot \tan(\delta_s)]$$

$$ld = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}[-\tan(-0.389778) \cdot \tan(-20.92)]$$

$$ld = 12.02 \approx 12 \text{ horas}$$

Como se indicó en el capítulo II gracias a la ubicación geográfica del Ecuador hay 12 horas de sol durante el día durante todo el año [50].

Los valores calculados de los ángulos: de declinación solar, zenit, altitud solar, azimut, ángulo de la hora al atardecer y duración del día para el resto de meses se encuentran en el Anexo 1.

### 3.1.1 Estimación de la radiación sobre una superficie horizontal.

Con la ecuación (9) se calcula la radiación extraterrestre  $G_{ext}$  medida en el plano normal a la radiación, donde  $G_{sc}$  es la constante solar con un valor de 1366.1 [ $W / m^2$ ] valor adoptado por la ASTM en el año 2000, reemplazando el valor de  $N$  para el mes de enero se tiene:

$$G_{ext} = G_{sc} \left( 1.0 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot N}{365} \right)$$

$$G_{ext} = 1366.1 \left( 1.0 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot 10}{365} \right)$$

$$G_{ext} = 1410.19 \text{ [} W / m^2 \text{]}$$

Todos los datos calculados para el resto de meses del año se encuentran en el Anexo 1. La radiación solar diaria media mensual  $H_o$  sobre una superficie horizontal en la región extraterrestre se calcula con la ecuación (10):

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{ext} \cdot \left[ \cos L \cdot \cos \delta_s \cdot \sinh_{ss} + \frac{\pi \cdot h_{ss}}{180} \sin L \cdot \sin \delta_s \right]$$

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot 1410.19 \cdot [\cos(-0.389778) \cdot \cos(-20.91) \cdot \sin(90.15) + \dots$$

$$\frac{\pi \cdot 90.15}{180} \sin(-0.389778) \cdot \sin(-20.92)]$$

$$H_o = 36.4 [MJ / m^2]$$

El promedio mensual de la radiación solar diaria  $\bar{H}$  en  $MJ / m^2$  disponible en una superficie horizontal se obtiene empleando la ecuación (11).

$$\bar{H} = \left( a + b \cdot \left( \frac{n}{ld} \right) \right) \cdot \bar{H}_o$$

Los coeficientes de regresión a y b están dados por:

$$a = -0.309 + 0.539 \cdot \cos L - 0.0693 \cdot E_o + 0.290 \cdot \frac{n}{ld}$$

$$a = -0.309 + 0.539 \cdot \cos(-0.389778) - 0.0693 \cdot 2.729 + 0.290 \cdot \frac{5.2}{12}$$

$$a = 0.16$$

Y,

$$b = 1.527 - 1.027 \cdot \cos L + 0.0926 \cdot E_o - 0.359 \cdot \frac{n}{ld}$$

$$b = 1.527 - 1.027 \cdot \cos(-0.389778) + 0.0926 \cdot 2.729 - 0.359 \cdot \frac{5.2}{12}$$

$$b = 0.59$$

Reemplazando los valores se tiene que:

$$\bar{H} = \left( a + b \cdot \left( \frac{n}{ld} \right) \right) \cdot \bar{H}_o$$

$$\bar{H} = \left( 0.16 + 0.59 \cdot \left( \frac{5.2}{12} \right) \right) \cdot 36.4$$

$$\bar{H} = 15.1 [MJ / m^2]$$

El índice de claridad media mensual  $\bar{K}_T$  se obtiene con la ecuación (12).

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$$

$$\bar{K}_T = \frac{4195.63}{10104.023}$$

$$\bar{K}_T = 0.41$$

La media mensual diaria de radiación difusa que incide en áreas horizontales se obtiene al reemplazar los valores del índice de claridad y del promedio mensual de la radiación solar diaria en la ecuación (13):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.39 - 4.027 \cdot \bar{K}_T + 5.531 \cdot \bar{K}_T^2 - 3.108 \cdot \bar{K}_T^3$$

$$\bar{H}_d = \left( 1.39 - 4.027 \cdot 0.41 + 5.531 \cdot 0.41^2 - 3.108 \cdot 0.41^3 \right) \cdot 15.1$$

$$\bar{H}_d = 6.81 [MJ / m^2]$$

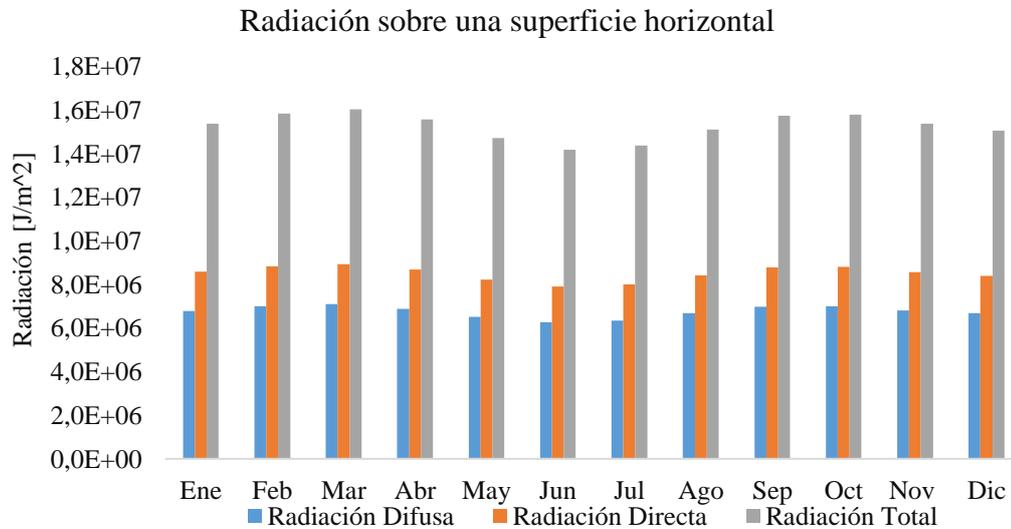
La media mensual diaria de radiación difusa que incide en un área horizontal se calcula con la ecuación (14):

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d$$

$$\bar{H}_b = 15.1 - 6.81$$

$$\bar{H}_b = 8.3 [MJ / m^2]$$

En la Figura 33 se visualiza los valores de la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal durante los meses del año de acuerdo con la ubicación del proyecto.



**Figura 33** Radiación sobre una superficie horizontal en la ubicación del proyecto. Elaborado por Carvajal & Mejía

De acuerdo con los datos del software RETScreen de la NASA el valor de la radiación diaria promedio sobre una superficie horizontal es de  $15.31 [MJ / m^2 / día]$  [60] como se indica en el Anexo 2, dado que la estación meteorológica que registra estos datos se encuentra alejada de la ubicación del proyecto, los cálculos realizados para la ubicación de interés indican una radiación diaria mensual promedio sobre una superficie horizontal de  $15 [MJ / m^2 / día]$  que se puede visualizar en el Anexo 2 tomando en cuenta los días promedios  $N$  para cada mes como se indicó en la Tabla 3.

### 3.1.2 Estimación de la radiación sobre una superficie inclinada.

El factor de conversión de la radiación directa  $\bar{R}_b$  se calcula como se muestra a continuación teniendo en cuenta los parámetros establecidos en el apartado del capítulo II:

Se toma en cuenta el valor mínimo de las siguientes expresiones:

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan -0.389778 \tan -20.92)$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-2.6 \times 10^{-3})$$

$$h_{ss} = 90.15^\circ$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta_s)$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(-0.389778 - 20) \tan -20.92)$$

$$h_{ss} = 98.16^\circ$$

Reemplazando en la ecuación (15) para hallar el factor de conversión  $\bar{R}_b$  se tiene:

$$\bar{R}_b = \frac{h_{ss} \cdot \sin(\delta_s) \cdot \sin(L - \beta) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(L - \beta) \cdot \sin(h_{ss})}{h_{ss} \cdot \sin(\delta_s) \cdot \sin(L) + \cos(\delta_s) \cdot \cos(L) \cdot \sin(h_{ss})}$$

$$\bar{R}_b = \frac{90.15 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin(-20.92) \cdot \sin(-0.389778 - 20) + \cos(-20.92) \cdot \cos(-0.389778 - 20) \cdot \sin(90.15)}{90.15 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin(-20.92) \cdot \sin(-0.389778) + \cos(-20.92) \cdot \cos(-0.389778) \cdot \sin(90.15)}$$

$$\bar{R}_b = 1.14$$

El factor de la radiación difusa  $\bar{R}_d$  se obtiene mediante la ecuación (16):

$$\bar{R}_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

$$\bar{R}_d = \frac{1 + \cos 20}{2}$$

$$\bar{R}_d = 0.96$$

El factor de conversión de la radiación solar reflejada  $\bar{R}_r$  está dado por la ecuación (17):

$$\bar{R}_t = \frac{1 - \cos \beta}{2} \rho$$

$$\bar{R}_t = \frac{1 - \cos 20}{2} \cdot 0.20$$

$$\bar{R}_t = 0.19$$

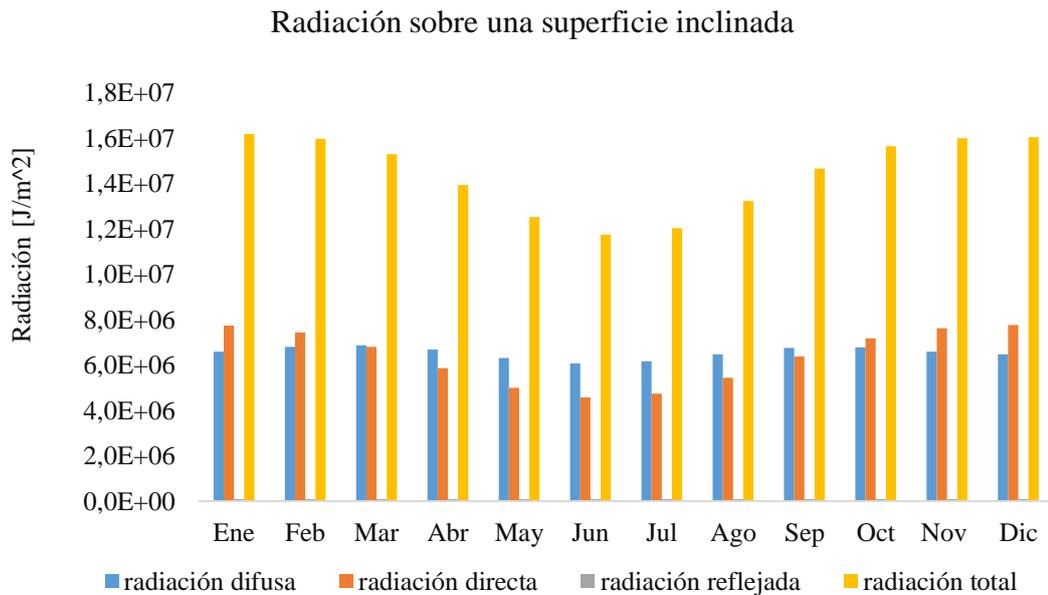
La radiación global sobre una superficie horizontal está dada por la ecuación (18):

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \rho$$

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{6.81}{15.1}\right) \cdot 1.14 + \frac{6.81}{15.1} \cdot 0.96 + 0.006$$

$$\bar{H}_T = 16.07 [MJ / m^2 / día]$$

En la Figura 34 se visualiza los valores de la radiación directa, difusa y reflejada sobre una superficie inclinada durante los meses del año de acuerdo con la ubicación del proyecto.



**Figura 34** Radiación sobre una superficie inclinada en la ubicación del proyecto. Elaborado por Carvajal & Mejía

El valor del promedio durante un año de la radiación sobre una superficie inclinada es de  $14.4 [MJ / m^2 / día]$  calculado para cada día promedio  $N$  del mes como se indicó en la Tabla 3, por lo que la radiación sobre la superficie inclinada a un ángulo  $\beta = 20^\circ$  de inclinación respecto a una superficie horizontal tomada en cuenta para los siguientes cálculos será de  $400 [W/m^2]$ .

### 3.2 Cálculo del balance energético

Con la finalidad de obtener el balance de energía de la piscina, se requiere determinar la energía que entra y la que sale del sistema, la ganancia obtenida del sol y la suma de todas las pérdidas involucradas en los procesos de transferencia de calor, para ello se toman en cuenta los datos obtenidos de la geometría de la piscina y los valores de temperaturas y coeficientes térmicos determinados en el proceso de investigación, los que se indican en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Datos para el cálculo del balance energético

<b>Factores de la piscina</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura de la piscina	32	°C
Superficie de la piscina	228.5	m <sup>2</sup>
Área de las paredes	116.32	m <sup>2</sup>
Volumen de la piscina	360	m <sup>3</sup>
Perímetro de la piscina	72.71	m
<b>Factores ambientales</b>		
<b>Denominación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura ambiente	14.3	°C
Humedad relativa	73	%
Presión atmosférica local	71.94	kPa
Radiación solar	400	W/m <sup>2</sup>

Elaborado por: Carvajal & Mejía

### 3.2.1 Cálculo de la energía que ingresa

Se calcula la potencia energética que gana el sistema gracias a la radiación solar, tomando como referencia los datos obtenidos durante el tiempo que se estudia el sistema, esto permite determinar una radiación promedio de 400 W/m<sup>2</sup>, también es necesario conocer el valor del coeficiente de absortividad del agua que depende de la profundidad de la piscina y de la absortancia del fondo y las paredes laterales. Para piscinas de colores claros, como es el caso de este estudio, se usará 0.85, por ser un valor sugerido por la ISO TC 180, norma de estandarización en el campo de la energía solar usada en calefacción, refrigeración, calefacción de procesos industriales y aire acondicionado de espacios y agua [61].

Por consiguiente, la potencia energética que ingresa al sistema se determina con la ecuación (29).

$$E_{entra} = I \cdot \alpha \cdot A_s$$

$$E_{entra} = 0.4 \cdot 0.85 \cdot 228.5$$

$$E_{entra} = 77.69kW$$

### 3.2.2 Cálculo de pérdidas por convección

Estas pérdidas se obtienen a partir de determinar el coeficiente de conductividad térmica del aire, la viscosidad cinemática y el número de Prandtl, para esto, se debe calcular la temperatura de película de la piscina con la ecuación (38).

$$T_f = \frac{(32 - 14.3)}{2}$$

$$T_f = 23.15^\circ C$$

Al determinar la temperatura de película e interpolar los datos obtenidos en el Anexo 3 de propiedades del aire, se obtienen los siguientes parámetros:

$$k = 0.0253731 W / mK$$

$$v = 1.54498 \times 10^{-5} m^2 / s$$

$$\text{Pr} = 0.730081$$

Además, se debe calcular la longitud característica y el coeficiente de expansión volumétrica con las ecuaciones (33) y (37) respectivamente.

$$L_c = \frac{A_s}{P}$$

$$L_c = \frac{228.5}{72.71}$$

$$L_c = 3.1426 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{(2315 + 273.15)}$$

$$\beta = 3.3749 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con los parámetros obtenidos anteriormente se procede al cálculo del número de Rayleigh utilizando la ecuación (36).

$$Ra = Gr \cdot \text{Pr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr}$$

$$Ra = Gr \cdot \text{Pr} = \frac{9.81 \cdot 3.3749 \times 10^{-3} \cdot (32 - 14.3) \cdot 3.1426^3}{(1.54498 \times 10^{-5})^2} \cdot 0.730081$$

$$Ra = 5.5628 \times 10^{10}$$

El número de Rayleigh se encuentra en un intervalo entre,  $107 < Ra < 1011$ , por lo tanto, al calcular el número de Nusselt se debe utilizar la ecuación (35).

$$Nu = 0.15 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 0.15 \cdot (5.5628 \times 10^{10})^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 572.6068$$

Al obtener el coeficiente de conductividad térmica del aire definido por la temperatura de película y la longitud característica determinada anteriormente, junto al número de Nusselt, es posible obtener el coeficiente de convección con la ecuación (32).

$$h = \frac{k \cdot Nu}{L_c}$$

$$h = \frac{0.0253731 \cdot 572.6068}{3.1426}$$

$$h = 4.6231 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Al obtener  $h$ , se realiza el cálculo de pérdidas por convección con la ecuación (31).

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 4.6231 \cdot 228.5 \cdot (32 - 14.3)$$

$$\dot{Q}_{conv} = 18.698 \text{ kW}$$

### 3.2.3 Cálculo de pérdidas por evaporación

Las pérdidas por evaporación están ligadas a las condiciones del ambiente como la presión y humedad relativas; por lo tanto, para poder determinar esta pérdida es necesario calcular la razón de evaporación del agua, que se expresa en unidades de masa sobre tiempo.

Al determinar la razón de evaporación es obligatorio calcular varias presiones y densidades que intervienen en el intercambio de calor, para esto se trabaja con una humedad relativa del 73% indicada en la Tabla 5, también, se utilizan varias propiedades y constantes obtenidas del agua y del aire mostradas en la Tabla 6, las mismas que se obtienen de los Anexos 4 y 5; con el fin de obtener los valores de las propiedades térmicas es necesario interpolar según la de temperatura con que se trabaja, de este modo se obtienen datos precisos al realizar los cálculos.

**Tabla 6.** Propiedades y constantes utilizadas en los cálculos.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de saturación del agua a $T_{\infty}$	$P_{sat\delta T_{\infty}}$	1.63825	kPa
Presión de vaporización del agua a $T_s$	$P_{vs}$	4.7988	kPa
Calor latente de vaporización del agua a $T_s$	$h_{fg}$	2426.2	kJ/kg
Constante del gas vapor	$R_v$	0.4615	kPa·m <sup>3</sup> /kg·K
Constante del gas aire	$R_a$	0.287	kPa·m <sup>3</sup> /kg·K

Elaborado por: Carvajal & Mejía

La presión de vaporización lejos de la superficie del agua es la primera en calcularse con la ecuación (49), utilizando  $\phi$  indicada en la Tabla 4 y la  $P_{sat\delta T_{\infty}}$  mostrada en la Tabla 6.

$$P_{v\infty} = \phi \cdot P_{sat\delta T_{\infty}}$$

$$P_{v\infty} = 0.73 \cdot 1.63825$$

$$P_{v\infty} = 1.1959 \text{ kPa}$$

Con la ecuación (51) se calcula la densidad de vapor en la superficie del agua, para ello se utiliza la  $P_{vs}$  y  $R_v$  mostradas en la Tabla 6.

$$\rho_{vs} = \frac{P_{vs}}{R_v \cdot T_s}$$

$$\rho_{vs} = \frac{4.7988}{0.4615 \cdot 305.15}$$

$$\rho_{vs} = 0.034 \text{ kg} / \text{m}^3$$

A continuación, se determina la densidad del aire seco en la superficie del agua con la ecuación (52), para lo que es necesario utilizar la constante del gas aire mostrada en la Tabla 6, la presión atmosférica indicada en la Tabla 5 y la presión de vaporización lejos de la superficie del agua calculada anteriormente.

$$\rho_{as} = \frac{Pat - P_{vs}}{R_a \cdot T_s}$$

$$\rho_{as} = \frac{71.94 - 4.7988}{0.287 \cdot 305.15}$$

$$\rho_{as} = 0.7666 \text{ kg} / \text{m}^3$$

La densidad en la superficie del agua se calcula sumando las densidades de vapor en la superficie del agua y la del aire seco en la superficie del agua obtenidas anteriormente, como indica la ecuación (50).

$$\rho_s = \rho_{as} + \rho_{vs}$$

$$\rho_s = 0.7666 + 0.034$$

$$\rho_s = 0.8 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Como siguiente paso se debe calcular la densidad total lejos de la superficie del agua esto se determina con la ecuación (47).

$$\rho_{v\infty} = \frac{P_{v\infty}}{R_v \cdot T_\infty}$$

$$\rho_{v\infty} = \frac{1.1959}{0.4615 \cdot 287.45}$$

$$\rho_{v\infty} = 9.0148 \times 10^{-3} \text{ kg} / \text{m}^3$$

La densidad del aire seco lejos de la superficie del agua se debe calcular con la ecuación (48).

$$\rho_{a\infty} = \frac{Pat - P_{v\infty}}{R_a \cdot T_\infty}$$

$$\rho_{a\infty} = \frac{71.94 - 1.1959}{0.287 \cdot 287.45}$$

$$\rho_{a\infty} = 0.8575 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Al tener estas dos densidades, se procede a sumarlas como indica la Ecuación (46) y se obtiene la densidad total lejos de la superficie del agua.

$$\rho_{\infty} = \rho_{a\infty} + \rho_{v\infty}$$

$$\rho_{\infty} = 0.8575 + 9.0148 \times 10^{-3}$$

$$\rho_{\infty} = 0.8665 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Al tener todos estos elementos es posible determinar el número de Grashof con la ecuación (45), necesario para determinar el número de Sherwood

$$Gr = \frac{g \cdot (\rho_{\infty} - \rho_s) \cdot Lc^3}{(\rho_{\infty} + \rho_s) \cdot v^2}$$

$$Gr = \frac{9.81 \cdot (0.8665 - 0.8) \cdot 3.1426^3}{(0.8665 + 0.8) \cdot (1.54498 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 5.0898 \times 10^{10}$$

Del mismo modo, también, se debe calcular la difusividad de la masa del vapor de agua, para lo que se usa la igualdad (42), donde hay que tener en cuenta que la presión atmosférica trabaja en unidades de atmosferas de presión.

$$D_{AB} = D_{H_2O-AIRE} = 1.78 \times 10^{-10} \cdot \frac{Tf^{2.072}}{Pat}$$

$$D_{AB} = 1.78 \times 10^{-10} \cdot \frac{(23.15 + 273.15)^{2.072}}{0.71}$$

$$D_{AB} = 3.4834 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Al obtener  $D_{AB}$ , se procede a calcular el número de Schmidt con la ecuación (53), el mismo que al multiplicarlo por el numero Grashof encontrado anteriormente, permite determinar el número de Sherwood, utilizando la ecuación adecuada según el orden del resultado.

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}}$$

$$Sc = \frac{1.54498 \times 10^{-5}}{3.4834 \times 10^{-5}}$$

$$Sc = 0.4435$$

El resultado del número de Grashof por el número de Schmidt, por lo tanto, será el siguiente:

$$Gr \cdot Sc = 5.0898 \times 10^{10} \cdot 0.4435$$

$$Gr \cdot Sc = 2.2573 \times 10^{10}$$

Puesto que el producto se encuentra en un intervalo entre,  $10^7 < Gr \cdot Sc < 10^{11}$ , se determina el número de Sherwood con la ecuación (44).

$$Sh = 0.15 \cdot (Gr \cdot Sc)^{\frac{1}{3}}$$

$$Sh = 0.15 \cdot (2.2573 \times 10^{10})^{\frac{1}{3}}$$

$$Sh = 423.9253$$

El determinar  $D_{AB}$  y  $Sh$  permite que sea posible evaluar el coeficiente de transferencia de masa al utilizar la ecuación (40).

$$h_{masa} = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{Lc}$$

$$h_{masa} = \frac{423.9253 \cdot 3.4834 \times 10^{-5}}{3.1426}$$

$$h_{masa} = 4.6989 \times 10^{-3} \text{ m / s}$$

Es este coeficiente el que permite calcular la razón de evaporación con la ecuación (39), la misma que es la necesaria para calcular la pérdida por evaporación.

$$m_v = h_{masa} \cdot As \cdot (\rho_{vs} - \rho_{v\infty})$$

$$m_v = 4.6989 \times 10^{-3} \cdot 228.5 \cdot (0.034 - 9.0148 \times 10^{-3})$$

$$m_v = 0.02682 \text{ kg / s}$$

Por último, se debe determinar el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de la superficie, el mismo que se indica en la Tabla 5, esto permite calcular la pérdida por evaporación con la ecuación (38).

$$\dot{Q}_{ev} = m_v \cdot h_{fg}$$

$$\dot{Q}_{ev} = 0.02682 \cdot 2426.2$$

$$\dot{Q}_{ev} = 65.0877 \text{ kW}$$

### 3.2.4 Cálculo de pérdidas por conducción

Estas son pérdidas que dependen de las características que poseen los materiales utilizados en la construcción de la piscina y la geometría definida por la arquitectura de esta. Al proceder con el estudio de este proyecto, es fundamental determinar las propiedades físicas de dichos materiales, como son la baldosa y el ladrillo con conductividad térmica  $k$  de 1.5 y 0.72 [kW/m·K], un espesor  $L$  de 8 y 110 [mm] respectivamente.

La resistencia total se calcula mediante la ecuación (54), teniendo en cuenta que el área de transferencia es el área del suelo junto al área de las paredes de la piscina, las cuales están indicadas en la Tabla 5.

$$RT = \frac{L1}{k_1 \cdot Asp} + \frac{L2}{k_2 \cdot Asp}$$

$$RT = \frac{1}{344.82} \cdot \left( \frac{8 \times 10^{-3}}{1.5} + \frac{11 \times 10^{-2}}{0.72} \right)$$

$$RT = 4.5853 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

La temperatura a los alrededores del cerramiento de la piscina se obtiene tras hacer varias mediciones cuando el sistema se encuentra en funcionamiento, obteniendo una temperatura aproximada de 18 °C, tomando en cuenta este dato y la resistencia total, se procede a calcular la pérdida por conducción con la ecuación (54).

$$\dot{Q}_{cond} = \left( \frac{T_s - T_1}{RT} \right)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \left( \frac{32 - 18}{4.5853 \times 10^{-4}} \right)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 30.532 \text{ kW}$$

### 3.2.5 Cálculo de pérdidas por renovación

Las pérdidas por renovación se originan debido a que el agua que se repone en el sistema por lo general se encuentra a menor temperatura que la deseada en la piscina, debido a que el club cuenta con un reservorio propio, el agua suministrada al sistema no es directamente la del flujo de agua de la red municipal y se encuentra un par de grados por encima de esta, así pues, la temperatura del agua que entra al sistema es aproximadamente de 16.4 °C. El valor de  $c_p = 4,20674 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$  y se obtiene al realizar una interpolación con los datos del Anexo (4), a una presión de constante de 71.94kPa, mientras que el valor de  $m_v$  fue obtenido en cálculos anteriores, lo que facilita obtener el valor de pérdidas por renovación usando la ecuación (56).

$$\dot{Q}_{re} = m_v \cdot c_p \cdot (T_s - T_{ain})$$

$$\dot{Q}_{re} = 0.02682 \cdot 4.20674 \cdot (32 - 16.4)$$

$$\dot{Q}_{re} = 1.76 \text{ kW}$$

### 3.2.6 Cálculo de pérdidas por radiación

Estas pérdidas se calculan al utilizar la ecuación (57), se obtiene el  $\varepsilon_p = 0.953215$  del Anexo 8, al realizar una interpolación de los datos dados para agua profunda y conociendo que  $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$  es constante. Es fundamental no olvidar que las temperaturas se deben trabajar en unidades Kelvin.

$$\dot{Q}_r = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_s^4 - T_\infty^4)$$

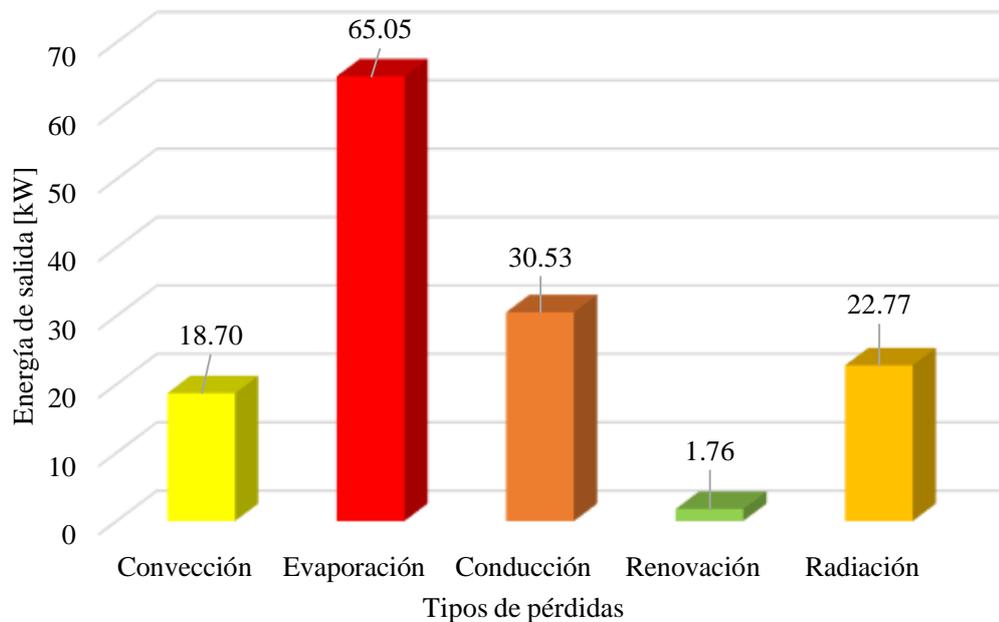
$$\dot{Q}_r = 0.953215 \cdot 5.6704 \times 10^{-8} \cdot 228.5 \cdot (305.15^4 - 287.45^4)$$

$$\dot{Q}_r = 22.767 \text{ kW}$$

### 3.2.7 Cálculo de pérdidas totales del sistema

Al obtener todas las pérdidas de energía existentes en el sistema de la piscina, pasan a ser representadas en la Figura 35, lo que permite entender de forma clara que las pérdidas más significativas son las que ocurren por la evaporación, mientras que las

menos influyentes son las originadas por la renovación del agua que ingresa a la piscina.



**Figura 35** Pérdidas de energía. Elaborado por Carvajal & Mejía.

A continuación, se procede a realizar la sumatoria de todas las pérdidas existentes en el sistema utilizando la ecuación (30), de esta manera se obtiene el resultado de pérdidas totales, el mismo que es necesario para posteriormente determinar el balance energético del sistema y la cantidad de colectores requeridos para obtener la temperatura deseada.

$$\dot{E}_{sale} = \dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{re}$$

$$\dot{E}_{sale} = 65.0877 + 22.767 + 18.698 + 30.532 + 1.76$$

$$\dot{E}_{sale} = 138.8447 kW$$

### 3.2.8 Balance energético

El balance energético del sistema se obtiene al utilizar la ecuación (27), esto da una idea clara de la cantidad de energía que suministra el conjunto de colectores solares, teniendo en cuenta que este valor es una media, según las condiciones térmicas que se presentan en la piscina durante todo el año.

$$E = E_{sale} - E_{entra}$$

$$E = 138.8447 - 77.69$$

$$E = 61.1547 \text{ kW}$$

### 3.3 Eficiencia del colector solar con tubos de vacío

La eficiencia para distintos tipos de colectores varía dependiendo de la relación que existe entre la diferencia de la temperatura promedio de salida del colector y la temperatura ambiente sobre la radiación de la zona.

$$\frac{T_{prom\_out} - T_{\infty}}{I}$$

$$\frac{328.15 \text{ K} - 287.45 \text{ K}}{400 \text{ W} / \text{m}^2}$$

$$0.10$$

La temperatura promedio de salida de 55 °C se obtuvo de datos experimentales tomados al momento de la demostración del funcionamiento de los equipos que se colocaron en las instalaciones del Club Castillo de Amaguaña por parte de la empresa DISTEC “Energía del Futuro” como se observa en la Figura 36 a finales del mes de febrero de 2020.



**Figura 36.** Montaje para la demostración del funcionamiento de los equipos. Cortesía DISTEC

Con los datos experimentales registrados y el valor de 0.10 obtenido de relación de acuerdo a la ecuación anterior e intersecando con la línea correspondiente al colector de tubos de vacío se tiene que la eficiencia está alrededor del 65% como se observa en la Figura 37.

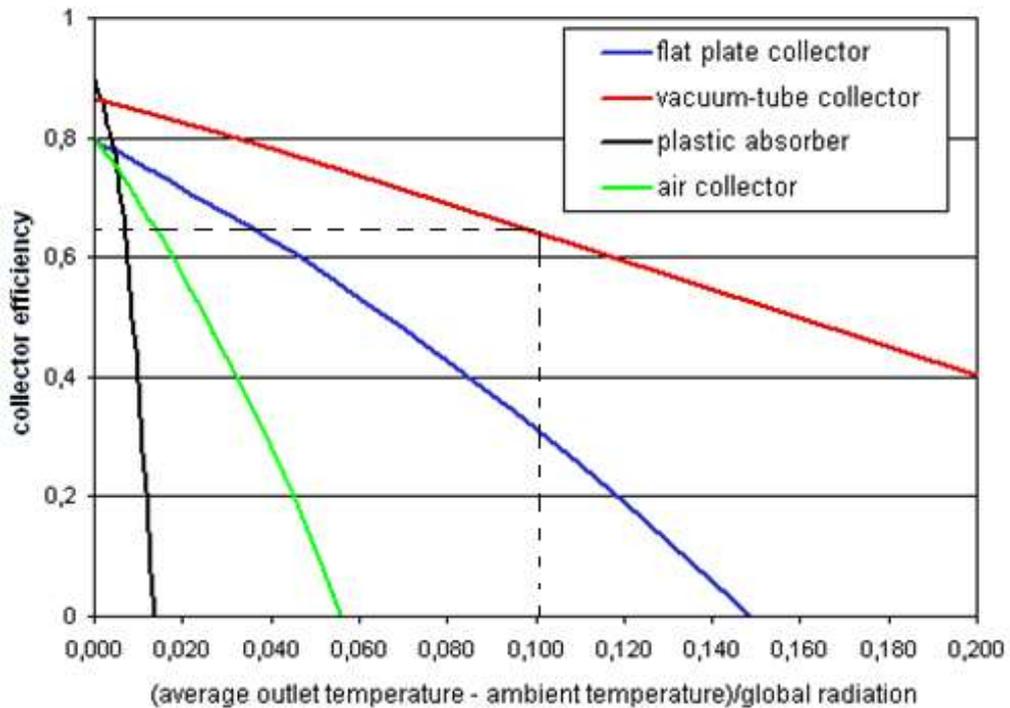


Figura 37. Eficiencia de diferentes tipos de colectores [62].

### 3.4 Cálculo del área de colectores solares

Conociendo la cantidad de energía que debe suministrar el conjunto de colectores solares, se calcula en área que ocuparan los mismos utilizando la ecuación (58), asumiendo una eficiencia del 65 %, esto permite ubicar una zona cercana a la piscina, con el espacio físico adecuado para su instalación.

$$A_{co} = \frac{\dot{E}}{\eta \cdot I}$$

$$A_{co} = \frac{61.1547}{0.65 \cdot 0.4}$$

$$A_{co} = 235.21 \text{ m}^2$$

### 3.5 Cálculo del número de colectores solares

Con la ecuación (59) se determina el número de colectores que se deben utilizar para mantener un suministro de energía adecuado al fin de mantener la temperatura deseada de 32 ° C, tomando en cuenta que el área de absorción de cada colector es de 7,86 m<sup>2</sup>.

$$N = \frac{A_{co}}{A_u}$$

$$N = \frac{235.21}{7.86}$$

$$N = 29.9249 \approx 30 \text{ Colectores}$$

### 3.6 Selección del modelo de colector solar

De acuerdo con el área de captación solar requerida se toma en consideración el colector de tubos de vacío tipo mariposa modelo SNCH-50 como se indica en la figura 38 ya que según los datos del fabricante este equipo es ideal para aplicaciones residenciales o comerciales y recomendado en el calentamiento de piscinas.



**Figura 38** Sistema de colectores con tubos de vacío tipo mariposa. [63]

Las especificaciones del colector de origen australiano de acuerdo con el datasheet proporcionado por DISTEC se indica en la Tabla 7.

**Tabla 7** Datos técnicos colector de tubos de vacío modelo SNCH-50

Descripción	Valor
<b>Diámetro exterior</b>	58 [mm]
<b>Diámetro interior</b>	47 [mm]
<b>Espesor del tubo</b>	1.65 [mm]
<b>Longitud del tubo</b>	1.8 [m]
<b>Emisividad vidrio</b>	0.9
<b>Emisividad placa absorbadora</b>	0.05
<b>Temperatura exterior tubo</b>	21 [°C]
<b>Temperatura interior tubo</b>	50 [°C]
<b>Conductividad térmica del vidrio</b>	0.74 [W/m <sup>2</sup> ]

Elaborado por: Carvajal & Mejía

El volumen de agua dentro de los tubos de vacío se calcula tomando en cuenta el diámetro interior del tubo:

$$V = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot L$$

$$V = \frac{\pi \cdot 0.047^2}{4} \cdot 1.8$$

$$V = 3.12 \times 10^{-3} m^3$$

El volumen por cada colector sería el volumen de cada tubo multiplicado por 50 tubos y el volumen total del proyecto serían multiplicados por 30 colectores y se tiene que:

$$V = 3.12 \times 10^{-3} m^3 \cdot 50_{\text{tubos}} \cdot 30_{\text{colectores}}$$

$$V = 4.68 \approx 4.7 m^3$$

### 3.7 Cálculo de pérdidas de calor en el colector

El tubo de vacío consta de un tubo interior, un tubo exterior y una placa de recubrimiento como se indica en la Figura 39, según los datos obtenidos del datasheet del equipo se tiene los siguientes datos mostrados en la Tabla 8.



Figura 39 Parámetros del tubo de vacío. Elaborado por Carvajal & Mejía.

Tabla 8 Diámetros internos y externos del tubo de vacío.

Descripción	Valor
<b>r1: radio placa absorbente</b>	21.85 [mm]
<b>r2: radio interno del tubo interno</b>	21.85 [mm]
<b>r3: radio externo del tubo interno</b>	23.5 [mm]
<b>r4: radio interno del tubo externo</b>	27.35 [mm]
<b>r5: radio externo del tubo externo</b>	29.00 [mm]
<b>L: longitud</b>	1.8 [m]

El coeficiente de convección se calcula utilizando la ecuación de flujo de calor hacia el aire:

$$h_{conv} = 5.7 + 3.8 \cdot v$$

$$h_{conv} = 5.7 + 3.8 \cdot 2.2 \frac{m}{s}$$

$$h_{conv} = 14.06 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{C}$$

La resistencia térmica por convección está dada por:

$$R_1 = \frac{1}{h_{conv} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}$$

$$R_1 = \frac{1}{14.06 \cdot \pi \cdot 0.058 \cdot 1.80}$$

$$R_1 = 0.216 \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

La temperatura del cielo se determina mediante:

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 \cdot (T_{\text{amb}})^{1.5}$$

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 \cdot (14 + 273)^{1.5}$$

$$T_{\text{cielo}} = 268.38 \text{ K}$$

El coeficiente de radiación se calcula a partir de:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{ext\_tubo}} + T_{\text{cielo}}) \cdot (T_{\text{ext\_tubo}}^2 + T_{\text{cielo}}^2)$$

$$h_{\text{rad}} = 0.9 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot (294 + 268.38) \cdot (294^2 + 268.38^2)$$

$$h_{\text{rad}} = 4.547 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

El valor de la resistencia térmica de la radiación del ambiente:

$$R_2 = \frac{1}{h_{\text{rad}} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}$$

$$R_2 = \frac{1}{4.547 \cdot \pi \cdot 0.058 \cdot 1.80}$$

$$R_2 = 0.67 \text{ °C / W}$$

La resistencia térmica por conducción en la pared externa del tubo de vacío se determina mediante:

$$R_{1-2} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

$$R_{1-2} = \left( \frac{1}{0.216} + \frac{1}{0.67} \right)^{-1}$$

$$R_{1-2} = 0.16 \text{ °C / W}$$

La resistencia térmica por conducción en la pared externa del tubo de vacío se determina mediante:

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{vidrio}} \cdot L}$$

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{0.029}{0.02735}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0.741.8}$$

$$R_3 = \frac{\ln(1.0603)}{8.3692}$$

$$R_3 = 7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

El coeficiente de radiación se calcula a partir de:

$$h_{\text{rad-v}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{int\_tubo}} + T_{\text{ext\_tubo}}) \cdot (T_{\text{int\_tubo}}^2 + T_{\text{ext\_tubo}}^2)$$

$$h_{\text{rad-v}} = 0.05 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot (323 + 294) \cdot (323^2 + 294^2)$$

$$h_{\text{rad-v}} = 0.33 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La resistencia térmica de la radiación en el vacío:

$$R_4 = \frac{1}{h_{\text{rad-v}} \cdot \pi \cdot d_3 \cdot L}$$

$$R_4 = \frac{1}{0.33 \cdot \pi \cdot 0.047 \cdot 1.8}$$

$$R_4 = 11.40 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

La conducción en el interior del tubo interno se obtiene por:

$$R_5 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{vidrio}} \cdot L}$$

$$R_5 = \frac{\ln\left(\frac{0.0235}{0.02185}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0.741.8}$$

$$R_5 = 8.7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

La resistencia térmica por conducción en la pared de la placa absorbedora es cero debido a que los diámetros  $r_2$  y  $r_3$  son aproximadamente iguales.

$$R_5 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{vidrio}} \cdot L}$$

$$R_5 = 0 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

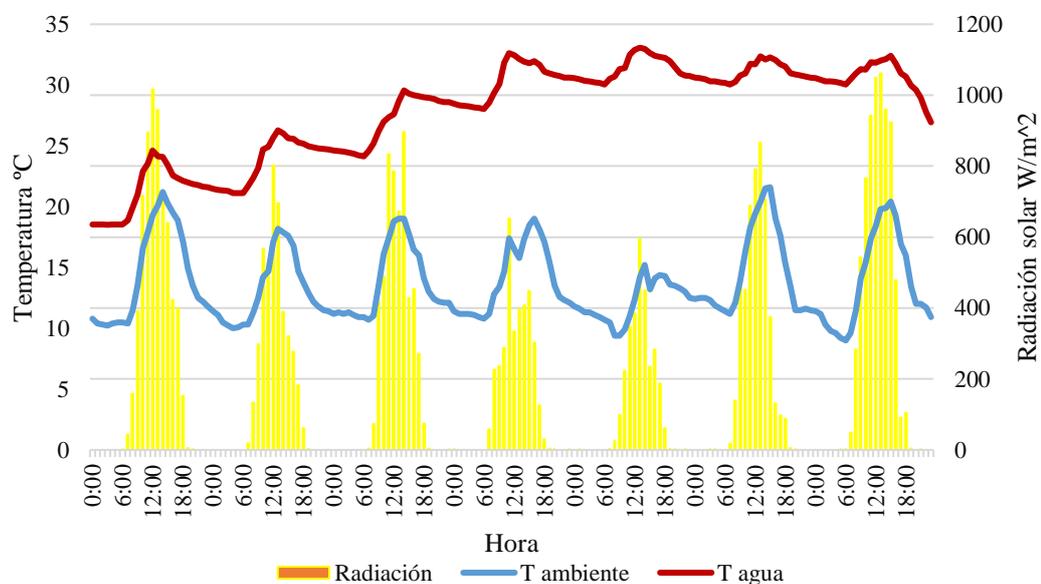
Entonces, la resistencia térmica total está dada por:

$$R_T = 0.16 + 7 \times 10^{-3} + 11.40 + 8.7 \times 10^{-3} + 0$$

$$R_T = 11.57 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

### 3.8 Temperatura del agua de la piscina

La Figura 40 muestra como incrementa la temperatura de la piscina en la semana del 17 de agosto al 23 de agosto del mismo año, junto al comportamiento de la radiación solar diaria y la temperatura del ambiente.



**Figura 40** Evolución de la temperatura de la piscina. Elaborado por Carvajal & Mejía.

Todos estos datos son obtenidos experimentalmente al evaluar el funcionamiento del sistema de colectores de manera real en la semana de pruebas, así se evidencia que las mediciones mostradas en la figura anterior indican que la menor temperatura del agua fue de 18.5 °C el lunes 17 de agosto antes de iniciar el funcionamiento del sistema de colectores solares; mientras que la temperatura más alta se alcanzó el viernes 21 de agosto, la misma que fue de 33.1 °C. A partir de este punto la temperatura del agua se estabilizó, promediando temperaturas alrededor los 32 °C por las mañanas y los 29-30 °C por las noches, previamente utilizando la manta térmica.

### 3.9 Diseño de la instalación

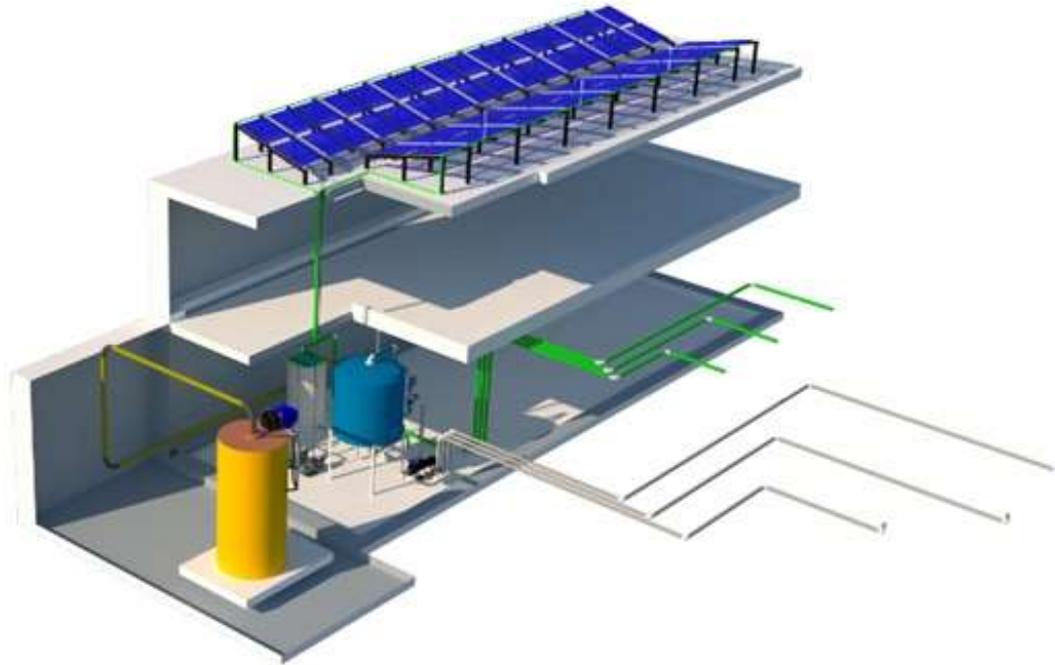
El espacio para la instalación de los colectores se encuentra en la terraza del área del SPA del Club Castillo de Amaguaña junto a la piscina que se analiza en este documento, este espacio es idóneo ya que no contamina el área visual de las instalaciones, no existe objetos alrededor que produzcan algún tipo de sombras sobre los colectores, es totalmente plano y lo suficientemente rígido para soportar el peso de los equipos, un modelo computarizado se ilustra en la Figura 41.



**Figura 41** Modelo gráfico con la ubicación de los colectores. Elaborado por Carvajal & Mejía.

De igual manera en la Figura 42 se visualiza el circuito hidráulico y los equipos que forman parte del sistema de calentamiento actual mediante el caldero acoplados a los

equipos requeridos para la implementación del sistema de colectores con tubos de vacío. Otras vistas se pueden observar en los anexos.



**Figura 42** Circuito hidráulico de los colectores y caldero. Elaborado por Carvajal & Mejía.

### 3.10 Conclusiones del capítulo

Las fórmulas presentadas en el anterior capítulo permiten realizar cálculos importantes, en cada uno de los factores del sistema, de esta manera se logran determinar parámetros importantes para el diseño. Entre los datos más relevantes encontrados, están, los ángulos solares, el balance energético de la piscina, el área y número de colectores necesarios para el sistema y las pérdidas de energía en cada colector.

Los cálculos analíticos que se realizaron utilizando datos reales de las variables que intervienen como son: radiación solar, temperatura de la piscina, temperatura ambiente, humedad relativa, pérdidas de la piscina entre otras, permiten establecer que, con el número de colectores calculados, 30 colectores con un área total de  $235.8 \text{ m}^2$  se puede conseguir una temperatura de confort estable de aproximadamente  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , para una piscina de  $228.5 \text{ m}^2$  de superficie y  $360 \text{ m}^3$  de volumen total.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA DE COLECTORES CON TUBOS DE VACÍO**

En el presente capítulo se analiza la relación del costo-beneficio que resultará de la implementación del sistema de colectores con tubos de vacío que aprovechan la energía solar térmica para climatizar la piscina del Club Castillo de Amaguaña; además de reservar el uso del sistema de calentamiento actual que esa a través de una caldera de 40 BHP que actualmente tiene 14 años de funcionamiento con la finalidad de disminuir el uso de productos derivados del petróleo y reducir el impacto ambiental. Se toma los precios actuales de distribuidores e importadores en la moneda local con el fin de estimar la inversión inicial, que implica la puesta en marcha, lo que permitirá lograr una visión de la viabilidad del proyecto, para ello se calculará el VIR, TIR y la recuperación de la inversión.

#### **4.1 Costos directos**

Los costos directos están relacionados con la fabricación de productos o servicios, además, se consideran los costos de materiales, mano de obra y equipo necesario en la construcción del proyecto.

A continuación, se detalla la información de los equipos, sistema hidráulico, sistema de control y manta térmica que serán utilizados en la construcción del sistema de climatización para la piscina, los costos que se presentan en el siguiente apartado fueron establecidos durante los meses de febrero a marzo del 2020 periodo en el cual se realizó el ensamblaje, demostración del funcionamiento y registro de datos experimentales.

##### **4.1.1 Equipos y materiales necesarios**

Los colectores de tubos de vacío seleccionados en el capítulo III corresponden a uno de los varios modelos existentes en el mercado específicamente diseñados y utilizados en la climatización de piscinas, además, estos van incluido de una red de tuberías con características específicas para la circulación de agua, esta circulación está controlada mediante un sistema de control automático y se considera el uso necesario de una manta térmica que evitará las pérdidas de calor principalmente por evaporación. En

la Tabla 9 se enumera los equipos y materiales necesarios para la puesta en marcha del proyecto.

**Tabla 9.** Lista de los equipos y materiales

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Total [USD]</b>
1	Colector tipo mariposa modelo SNCH de 50 tubos	30	483.82	14514.6
2	Bomba de piscina 3 hp	2	380.42	760.84
3	Sistema de control solar piscina	1	320	320
4	Tablero eléctrico y accesorios	1	290	290
5	Tubería PVC 1 ½" (6m)	16	16.25	260
6	Tubería CPVC 2" (6m)	16	38.9	760.84
7	Válvula de 3 vías con controlador	1	260	260
8	Estructura soporte de los colectores	1	6500	6500
9	Manta térmica	225	18.3	4117.5
10	Válvulas de alivio	2	25	50
11	Válvula universal	2	15	30
12	Válvula de compuerta	2	19.6	39.2
13	Válvula Check	4	14.6	58.4
14	Válvula esférica	4	17.2	68.8
15	Universales	30	2.85	85.5
16	Codos	28	0.29	8.12
17	Otros accesorios	-	100	100
<b>Total</b>				<b>28075.36</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

#### **4.1.2 Costos de asesoría y diseño**

Durante el diseño del sistema de climatización solar de la piscina con colectores de tubos de vacío en lo que respecta a los colectores solares, sistema hidráulico, eléctrico y de control se requirió de la asistencia de profesionales y empresas extranjeras que se dedican a la venta, diseño e instalación de este tipo de tecnologías. Además, en la parte

técnica de la instalación se tomó un curso de instalaciones solares térmicas de climatización de piscinas, las asesorías y cursos se encuentran descritas en la Tabla 10, de esta manera se logró determinar cada equipo y accesorio para su correcto funcionamiento.

**Tabla 10.** Cursos y asesorías para el diseño del proyecto.

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tiempo</b> [h]	<b>Costo</b> [USD/h]	<b>Total</b> [USD]
1	Asesoría empresa extranjera EFIC ENERGÍA. Colombia	10	9	90
2	Asesoría empresa extranjera SUN CONNECTIONS. Colombia	12	8	96
3	Curso internacional de instalaciones solares en climatización de piscinas. Argentina	40	4.5	180
<b>Total</b>				<b>366</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

#### **4.1.3 Costos de mano de obra**

La mano de obra requerida para el montaje de equipos, conexión del circuito hidráulico, eléctrico y de control debe ser altamente calificada, por ello parte del equipo de mantenimiento del Club Castillo de Amaguaña especializado en instalaciones hidrosanitarias e instalaciones eléctricas de baja tensión aportaran durante la ejecución del proyecto durante la jornada normal de trabajo. En lo que respecta a la contratación de mano de obra adicional se especifica en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Costos de mano de obra.

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tiempo</b> [h]	<b>Costo</b> [USD/h]	<b>Total</b> [USD]
1	Calibración del sistema de control	8	10	80
2	Análisis químico del agua de la piscina	2	40	80
3	Ingeniería del proyecto (tesistas)	80	11.60	928
<b>Total</b>				<b>1088</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

#### 4.1.4 Costos directos

En la Tabla 12 se detalla el valor total de la sumatoria de los costos directos que se revisaron anteriormente.

**Tabla 12.** Resumen de los costos directos

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Total [USD]</b>
1	Equipos y materiales	28075.36
2	Cursos y asesorías	366
3	Mano de obra	1088
<b>Total costos directos</b>		<b>29529.36</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

#### 4.2 Costos indirectos

Los costos indirectos no están relacionados de manera directa con el desarrollo del proyecto, de lo contrario surgen en diferentes etapas de este, ejemplo de esto se tiene: gastos de transporte, internet, electricidad, imprevistos varios entre otros detallados en la Tabla 13. Se considera un 5% del total de los costos directos como costos indirectos.

**Tabla 13.** Resumen de los costos directos

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Total [USD]</b>
1	Imprevistos	1270.59
2	Electricidad	40
3	Internet	35
4	Transporte	50
<b>Total costos indirectos</b>		<b>1395.59</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

### **4.3 Costo total del proyecto**

Corresponde al valor total del proyecto donde se toman en cuenta los costos directos e indirectos del proyecto de climatización de la piscina como se observa en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Resumen de los costos directos

<b>Descripción</b>	<b>Costo Total [USD]</b>
Costos directos	29529.36
Costos indirectos	1395.59
<b>Costo total del proyecto</b>	<b>30924.95</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

### **4.4 Costos de operación y mantenimiento en la actualidad**

Actualmente se climatiza el agua de la piscina utilizando una caldera vertical de 40 BHP de 14 años, la cual se utiliza desde el viernes 10:00 am hasta el domingo 13:00 pm con la finalidad de incrementar la temperatura del vaso de la piscina de 19 °C a 31 °C que es la temperatura de uso. Se recalca que se continuará dependiendo de la caldera durante los días nublados o lluviosos, ya que la eficiencia de los sistemas de colectores disminuye en estas condiciones climáticas.

#### **4.4.1 Costos del uso de combustibles**

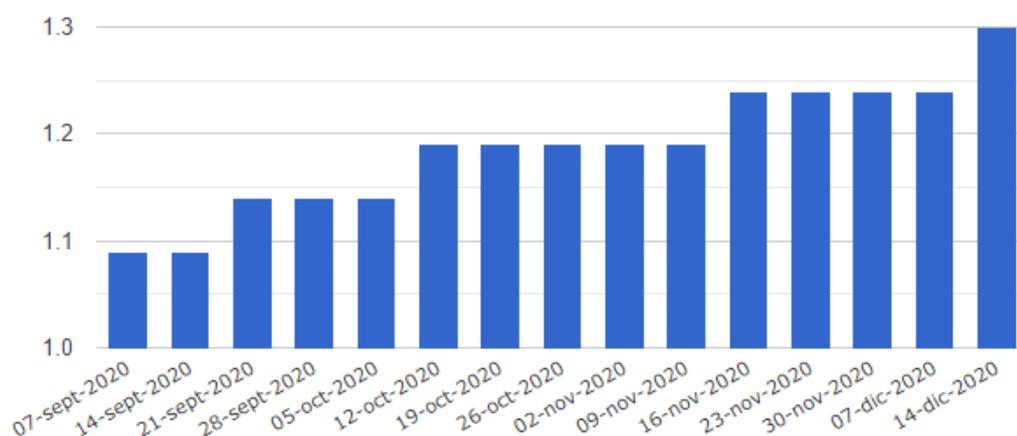
De acuerdo con los datos registrados del consumo semanal de diésel industrial tipo 2 para el proceso de calentamiento del agua de la piscina se tiene el consumo total mensual como referencia del mes de septiembre según se registra en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Consumo mensual de combustible

Descripción	Galones por semana
del 2 al 4 de septiembre	209
del 9 al 11 de septiembre	206
del 16 al 18 de septiembre	207
del 23 al 25 de septiembre	208
<b>Total</b>	<b>830 [gal/mes]</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

El diésel es un combustible subsidiado por el estado, sin embargo, su precio está regido a precios internacionales que fluctúan entre  $\pm 5\%$  cada mes vigente desde el mes de julio [64] y su valor se ha ido incrementando en los últimos meses como se indica en la Figura 43 según datos de Global Petrol Prices [65].



**Figura 43.** Precios del galón de diésel en Ecuador en USD. [65]

El gasto de combustible varía dependiendo de los meses ya que en fechas festivas el Club Castillo de Amaguaña amplía los días de apertura, por lo tanto el consumo mensual se eleva en un 30 % respecto a los meses con atención normal sin feriados.

El costo del combustible diésel industrial tipo 2 utilizado en el proceso de calentamiento, de acuerdo con el registro de consumo mensual indicado anteriormente se registran en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Costo del consumo mensual de combustible

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Total [USD]</b>
	<b>[gal]</b>	<b>[USD/gal]</b>	
Diésel industrial tipo 2	830	1.318	1093.94
Transporte			40
<b>Total</b>			<b>1133.94</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

Dado el valor de 1133.94 USD mensual que gasta el Club Castillo de Amaguaña, el valor anual sería de aproximadamente 13607.28 USD. Con la propuesta se pretende ahorrar alrededor del 65% del valor anual en gastos por concepto de combustible, esto debido a que en ciertas ocasiones el sistema de colectores no pueda elevar la temperatura inicial de la piscina a la temperatura óptima de uso, principalmente en los días lluviosos o totalmente nublados, por lo que una parte del aporte de energía calorífica la dará el caldero.

#### 4.4.2 Costos del tratamiento químico de la piscina

Para conservar el agua del vaso de la piscina en óptimas condiciones es necesario suministrar ciertos químicos de manera permanente que representan un costo mensual como se indica en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Costo mensual del tratamiento químico de la piscina

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Kg/mes</b>	<b>Costo [USD]</b>
1	Cloro granulado	90	201.6
2	Pastillas de cloro	16	53.76
3	Regulador de pH	60	168
	<b>Total</b>		<b>423.36</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

Al igual que el apartado anterior donde se analizó el consumo mensual de combustible, estos costos mensuales de tratamiento químico pueden variar entre un 15 al 20% dependiendo de los días festivos en los que el Club Castillo de Amaguaña tenga que ampliar su horario de atención.

Dado el valor de 423.36 USD mensual que gasta el Club Castillo de Amaguaña, el valor anual sería de aproximadamente 5080.32 USD.

#### 4.5 Costos de operación y del mantenimiento con los colectores

En los equipos requeridos dentro del diseño de colectores se encuentran 2 bombas de piscina de 3 HP cada una que estarán encargadas de la recirculación del agua a través de los tubos de vacío y manifolds desde la red hidráulica de succión hasta la red hidráulica de inyectores. El costo adicional será únicamente por el consumo de energía de las bombas y del sistema de control que mide la diferencia de temperaturas y activa o desactiva la válvula de 3 vías encargada de la recirculación automáticamente cuando se alcanzado la temperatura deseada en la piscina.

##### 4.5.1 Consumo eléctrico mensual del equipo

Al necesitar de dos bombas de 3 HP con el objetivo de recircular el agua de la piscina y el sistema de control es necesario conocer el valor del consumo eléctrico mensual como se indica en la Tabla 18, se estima que trabajará 10 horas diarias durante el día donde los colectores captan la energía del sol.

**Tabla 18.** Consumo eléctrico mensual

<b>Equipo</b>	<b>Potencia consumida [kW]</b>	<b>Tiempo de uso mensual [h]</b>	<b>Consumo eléctrico mensual [kWh]</b>
Bomba 3 hp	2.23	180	401.4
Sistema de control	0.176	720	126.72
<b>Total</b>			<b>528.12</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

El costo mensual se calcula utilizando la ecuación (57).

$$Costo_m = C_m \cdot V_t \quad (57)$$

Donde:

$C_m$ : Consumo mensual, [kWh]

$V_t$ : Valor tarifario, [USD/kWh]

Entonces, se tiene que el costo mensual de consumo eléctrico es:

$$Costo_m = C_m \cdot V_t$$

$$Costo_m = 528.12 kWh \cdot 0.1285 USD / kWh$$

$$Costo_m = 67.86 USD$$

El valor extra que tendrá que cancelar en la planilla eléctrica será de 67.86 USD mensualmente, lo que equivale a 814.3 USD anuales.

#### 4.5.2 Costos del tratamiento químico con la propuesta

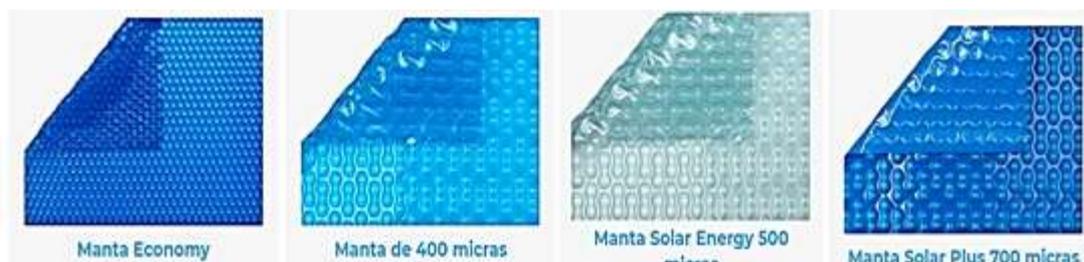
La manta térmica propuesta ayudará a reducir la utilización de productos químicos desde el 40 al 50 % [66], de igual manera reducir los tiempos de limpieza de la piscina ya que evita que caiga ciertos objetos como hojas, insectos, basura entre otros. Por lo que se proyecta un ahorro mensual como se indica en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Proyección del ahorro mensual y anual en productos químicos

<b>Descripción</b>	<b>Consumo mensual actual [USD]</b>	<b>Ahorro mensual [-40%]</b>	<b>Ahorro anual [USD]</b>
Tratamiento químico	423.36	169.34	2032.12
<b>Total ahorro</b>			<b>2032.12</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

La versión más comercializada de la manta térmica es aquella elaborada con polietileno, polipropileno o vinilo, con características como alta resistencia, baja densidad permitiendo su flotabilidad y tratamiento para soportar los rayos UV [67]. Tienen varias presentaciones y su calidad va de la mano con el grosor de la manta de acuerdo con la Figura 44, así se tiene que una manta térmica de 400 micras es la solución más económica fabricada en polietileno, de 500 micras que de materiales transparente que produce un efecto lupa sobre la piscina, la de 700 micras posee burbujas y debido a sus materiales de fabricación que brindan características traslucidas permite incrementar la temperatura de la piscina hasta 8 °C [68]. Su vida útil esta alrededor de 4 a 6 años dependiendo del trato que se le dé tanto dentro como fuera del agua.



**Figura 44** Tipos de mantas térmicas para piscinas [68].

#### 4.6 Ahorro total mensual y anual proyectado con el sistema de colectores

Basándose en las proyecciones de ahorro mensual tanto en el consumo de combustible como en el uso de productos químicos que mantienen el agua de la piscina óptima para su uso, se establece el ahorro mensual y anual en la Tabla 20, considerando la literatura existente sobre climatización de piscinas que pasaron de utilizar sistemas convencionales de calentamiento de agua a sistemas que incorporan energía solar.

**Tabla 20.** Ahorro mensual y anual proyectado con el sistema de colectores

Descripción	Consumo mensual actual [USD]	Proyección de ahorro %	Ahorro mensual [USD]	Ahorro anual [USD]
Uso de combustibles	1133.94	65%	737.06	8844.72
Uso de productos químicos	423.36	40%	169.34	2032.08
<b>Total</b>			<b>906.4</b>	<b>10876.85</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

#### 4.7 Análisis financiero

En el análisis económico del proyecto se compara mediante diferentes indicadores financieros si la inversión inicial requerida en la puesta en marcha permitirá al inversor obtener la rentabilidad deseada y la recuperación del capital invertido. Además, ofrece una visión sobre la viabilidad del proyecto y para ello se calculará el VAN, TIR y la recuperación de la inversión.

#### 4.7.1 Valor Actual Neto (VAN)

El VAN representa la relación entre los ingresos y los gastos de la inversión a través del tiempo, además mide el valor excedente luego de obtener la rentabilidad esperada y recuperado la inversión inicial [69]. La tasa de interés propuesta por el gerente del Club Castillo de Amaguaña es del 8% durante un periodo de 4 años. Se utiliza la ecuación (58).

$$VAN = -I_o + \sum_0^n \frac{FNE}{(1+i)^n} \quad (58)$$

Donde:

FNE: Representa el flujo neto de efectivo, [USD]

i: tasa de interés del 8 %

n: año en el que se genera el flujo de efectivo

Io: inversión inicial, [USD]

#### 4.7.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

El TIR representa el cálculo de la tasa de descuento al igualar el VAN a cero, refiriéndose al rendimiento de un proyecto a lo largo de su vida útil que involucra tanto ingresos como egresos de efectivo [69], se calcula mediante la ecuación (59).

$$0 = -I_o + \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i^*)^t} \quad (59)$$

Donde:

$S_t$ : Representa el flujo neto de efectivo del periodo t, [USD]

i\*: tasa interna de rendimiento

n: número de periodos

Io: inversión inicial, [USD]

t: periodos

Aplicando la ecuación (58) y (59) se obtiene la Tabla 21, donde se expresa los resultados durante un periodo de 4 años.

**Tabla 21.** Cálculo del VAN, TIR e IR para un periodo de 4 años.

<b>Periodo</b> <b>[años]</b>	<b>Ahorro</b> <b>[USD]</b>	<b>Gastos</b> <b>[USD]</b>	<b>Flujo de</b> <b>efectivo neto</b> <b>[USD]</b>	<b>Valor</b> <b>presente</b> <b>[USD]</b>	<b>Beneficio</b> <b>acumulado</b> <b>[USD]</b>
0			-30924.95	-30924.95	-30924.95
1	10876.85	814.30	10062.55	9317.18	-21607.77
2	10985.62	822.44	10163.18	8713.28	-12894.49
3	11095.47	830.67	10264.81	8148.53	-4745.95
4	11206.43	839.97	10367.46	7620.39	2874.43
<b>VALOR PRESENTE A LA SUMA DE FLUJO</b>					<b>33799.38 [USD]</b>
<b>VAN</b>					<b>2874.43 [USD]</b>
<b>TIR</b>					<b>12%</b>
<b>INDICE DE RENTABILIDAD</b>					<b>1.09</b>

Elaborado por Carvajal & Mejía.

Los resultados obtenidos se evalúan bajo tres condiciones que son:

Si  $VAN > 0$  el proyecto es rentable, si el  $VAN = 0$  el proyecto es indiferente ya que no se obtiene ganancias o pérdidas y si el  $VAN < 0$  el proyecto no es rentable e incurrirá en pérdidas [69]. Además, entre mayor sea el TIR, más rentable será el proyecto.

El VAN es de 33799.38 USD, siendo mayor que cero y el TIR con un valor del 12% por lo que la inversión es rentable.

### 4.7.3 Payback

El Payback o periodo de recuperación de la inversión es un indicador que permite saber el tiempo en que se recupera una inversión y se determina con la ecuación (60).

$$Payback = N + \frac{|F_a|}{F_a + 1} \quad (60)$$

Donde:

Payback: es el periodo de retorno de la inversión.

N: Número de periodos con flujo negativo

$F_a$ : Ultimo valor negativo del flujo acumulado

$F_{a+1}$ : Primer valor positivo del flujo acumulado

Al reemplazar los valores en la ecuación (59) utilizando los datos obtenidos en la Tabla 21 se tiene que:

$$Payback = N + \frac{|F_a|}{F_a + 1}$$

$$830 \text{ galones} = 3.14 \text{ m}^3 = 3141882 \text{ ml}$$

$$Payback = 3 + \frac{|-4745.95|}{2874.43}$$

$$Payback = 4.65 \text{ años}$$

#### 4.8 Rentabilidad ambiental del proyecto

En la actualidad, considerando solamente una de las piscinas del Club Castillo de Amaguaña donde se pretende usar la energía solar mediante colectores de tubos de vacío para incrementar la temperatura del agua de la piscina y aportar en la reducción del consumo de diésel disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero producto de la combustión, es de suma importancia determinar la cantidad de toneladas métricas de  $CO_2$  que se evitará depositar en el medio ambiente durante la vida útil de los equipos.

El consumo mensual en la actualidad es de 830 galones de diésel, se asume una combustión completa del hidrocarburo y se tiene que:

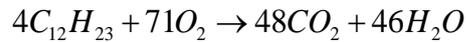
$$830 \text{ galones} = 3.14 \text{ m}^3 = 3141882 \text{ ml}$$

$$m_{diésel} = v_{diésel} \cdot \delta_{diésel}$$

$$m_{diésel} = 3141882 \text{ ml} * 0.850 \text{ g / ml}$$

$$m_{diésel} = 2670600 \text{ g / mes}$$

Se determina la cantidad de moles de diésel y moles de  $CO_2$  a partir de la ecuación de la combustión dada por:



$$moles_{diésel} = \frac{m_{diésel}}{peso\_molecular_{diésel}}$$

$$moles_{diésel} = \frac{2670600 \text{ g / mes}}{167 \text{ g / mol}}$$

$$mol_{diésel} = 15992 \text{ mol}$$

$$moles_{CO_2} = \frac{48}{4} \cdot C_{12}H_{23}$$

$$moles_{CO_2} = \frac{48}{4} \cdot 15992$$

$$moles_{CO_2} = 383799 \text{ mol}$$

Se calcula la masa de  $CO_2$  sabiendo que su masa molar es 44 g/mol.

$$m_{CO_2} = moles_{CO_2} \cdot masa\_molar_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = 383799 \text{ mol} \cdot 44 \text{ g / mol}$$

$$m_{CO_2} = 16887147 \text{ g} = 16887 \text{ kg}$$

Por lo que el  $CO_2$  producido mensualmente es de 16.9 toneladas métricas, al año se produce 202.8 Tm con el sistema actual de calentamiento mediante el uso de la caldera. Se pretende reducir el consumo de diésel en un 65 % mensual con el uso de los colectores de tubos de vacío, lo que resulta en una producción de 5.92 Tm y al año sería 70.92 Tm.

#### 4.9 Conclusiones del capítulo

Con el uso de la energía solar mediante los colectores de tubos de vacío se pretende disminuir en un 65% mensual el uso de diésel requerido al calentar el agua de la piscina, pudiendo elevarse el porcentaje de ahorro en días totalmente soleados y en la época de verano. Con el uso de la manta térmica se pretende reducir en un 40% mensual el uso de químicos en el tratamiento del agua al evitar que estos se evaporen,

de igual manera reducir las horas de mantenimiento que implican retirar los diferentes objetos que caen dentro de la piscina como son insectos, hojas, basura entre otros.

El costo total del sistema de colectores de tubos de vacío es de 30924.95 USD, mediante el uso de indicadores financieros se estableció un VAN positivo de 2874.43 USD al cuarto año y un TIR del 12%, el Payback indica que la recuperación de la inversión es de aproximadamente 4.6 años.

## CONCLUSIONES GENERALES

Se determinó que la piscina con un volumen de 360 m<sup>3</sup> y una superficie de 228.5 m<sup>2</sup> del Club Castillo de Amaguaña requiere un sistema de 30 colectores de tubos de vacío tipo mariposa modelo NSCH-50 de 50 tubos cada uno con un área de recolección solar individual de 7.86 m<sup>2</sup> y un área total de 235.8 m<sup>2</sup>, la radiación solar promedio mensual para la ubicación del proyecto se estimó en 400 W/m<sup>2</sup> cuyo aporte energético será de 61.15 kW a través de los tubos de vacío y elevará la temperatura del agua de la piscina de 19 °C a 32 °C que es la temperatura recomendable de servicio.

La manta térmica es indispensable para disminuir las pérdidas de energía por evaporación que representa el 46% del total de pérdidas durante los días y noches que no está en servicio, al igual que prevenir la caída de diferentes objetos dentro de la piscina que aumentan las horas de trabajo de limpieza y el uso de diferentes productos químicos.

La recolección de datos permitió establecer que el Club Castillo de Amaguaña requiere mensualmente de 830 galones de diésel industrial tipo 2 para incrementar la temperatura de la piscina de 19 °C a 32 °C durante el funcionamiento de la caldera entre viernes, sábados y domingos, con la implementación del sistema de colectores y la manta térmica se pretende disminuir en un 65% o más el uso de diésel industrial tipo 2 que actualmente utiliza la caldera para el proceso de calentamiento de agua.

Además, se determinó que se necesita mensualmente de 90 kg de cloro granulado, 16 kg de pastillas de cloro, 60 kg de regulador de pH entre otros productos para mantener en óptimas condiciones químicas el agua de la piscina. Con el uso de la manta térmica se pretende reducir en un 40% el uso de estos productos cuyas pérdidas se debe principalmente a la evaporación.

Mediante el análisis económico se determinó que el proyecto es viable a pesar de la inversión inicial que es de 30924.95 USD, al cuarto año se muestra un VAN positivo de 2874.43 USD, el TIR se estima en un 12% lo que hace aún más atractivo el proyecto, el Payback indica que la recuperación de la inversión es en 4.6 años.

En la parte ambiental se pretende reducir de 16.9 Tm de CO<sub>2</sub> mensuales con el sistema actual de calentamiento mediante el uso de la caldera a 5.92 Tm CO<sub>2</sub> mensuales o menos con la implementación del sistema de colectores de tubos de vacío siendo un aporte considerable a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

## **RECOMENDACIONES GENERALES**

Realizar una simulación mediante CFD del comportamiento de las pérdidas de calor de la piscina, basándose en los datos experimentales antes durante y después del calentamiento de la piscina a través de la caldera, lo que permitirá conocer con mayor exactitud los requerimientos energéticos necesarios con la finalidad de buscar otras propuestas viables y amigables con el medio ambiente.

El uso de la manta térmica permitirá minimizar las pérdidas por evaporación y reducir los costos de climatización, debido a las dimensiones de la piscina es recomendable diseñar un equipo que facilite la colocación y retiro de la manta al iniciar y finalizar la jornada de atención a los socios respectivamente. Además, los beneficios de la manta térmica dependen de su espesor y materiales de fabricación por lo que se recomienda buscar la disponibilidad en el país, de preferencia que su espesor sea superior a 500 micras, caso contrario optar por la importación de esta.

El uso de la manta térmica permitirá minimizar las pérdidas por evaporación y reducir los costos de climatización, debido a las dimensiones de la piscina es recomendable diseñar un equipo que facilite la colocación y retiro de la manta al iniciar y finalizar la jornada de atención a los socios respectivamente. Además, los beneficios de la manta térmica dependen de su espesor y materiales de fabricación por lo que se recomienda buscar la disponibilidad en el país, caso contrario optar por la importación de esta.

Se recomienda efectuar las pruebas químicas de calidad de agua de la piscina una vez instalado el sistema de colectores y la manta térmica ya que las cantidades de químicos no serán los mismos que se utilizan actualmente con la piscina descubierta y climatizada mediante la caldera.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL HIDROCARBURÍFERO, “Boletín Estadístico,” 2017.
- [2] EL PAÍS, “Ecuador elimina los subsidios a los combustibles.” [Online]. Available: [https://elpais.com/internacional/2015/10/23/america/1445551651\\_254704.html](https://elpais.com/internacional/2015/10/23/america/1445551651_254704.html). [Accessed: 21-Mar-2020].
- [3] GLOBAL CARBON ATLAS, “Emisiones de CO<sub>2</sub>,” 2018. [Online]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. [Accessed: 21-Mar-2020].
- [4] EL COMERCIO, “Ecuador se comprometió a reducir emisiones de gases de efecto invernadero,” 2019. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/tendencias/ecuador-reduccion-emision-efecto-invernadero.html>. [Accessed: 21-Mar-2020].
- [5] P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation,” *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–14, 2016.
- [6] S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, and R. Saidur, “Solar process heat in industrial systems – A global review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. January, pp. 2270–2286, 2018.
- [7] K. Chopra, V. V. Tyagi, A. K. Pandey, and A. Sari, “Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications,” *Appl. Energy*, vol. 228, no. March, pp. 351–389, 2018.
- [8] D. Mevada *et al.*, “Applications of evacuated tubes collector to harness the solar energy: a review,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 0, no. 0, pp. 1–18, 2019.
- [9] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, “Solar industrial process heating: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. December 2016, pp. 124–137, 2017.
- [10] Q. Li *et al.*, “Experiment and simulation study on convective heat transfer of

- all-glass evacuated tube solar collector,” *Renew. Energy*, vol. 152, pp. 1129–1139, 2020.
- [11] L. Kumar, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, “Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, no. February, pp. 885–908, 2019.
- [12] A. Siuta-Olcha, T. Cholewa, and K. Dopieralska-Howoruszko, “Experimental studies of thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar collector in Polish climatic conditions,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2020.
- [13] S. Lugo, L. I. Morales, R. Best, V. H. Gómez, and O. García-Valladares, “Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming-pool solar heating system in warm climates,” *Sol. Energy*, vol. 189, no. February, pp. 45–56, 2019.
- [14] R. S. Gonçalves, A. I. Palmero-Marrero, and A. C. Oliveira, “Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 717–724, 2019.
- [15] M. H. Badii, A. Guillen, and J. L. Abreu, “Energías Renovables y Conservación de Energía.,” *Rev. Daena (International J. Good Conscienc.*, vol. 11, no. 1, pp. 141–155, 2016.
- [16] V. Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems - (Malestrom).pdf*, Second Edi. London: Earthscan, 2016.
- [17] Asociación de Empresas de Energías Renovables, *Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España*, Asociación. Madrid, 2018.
- [18] L. Urdiales and J. L. Espinoza, *Energia solar en el Ecuador*, M. R. Pelá., no. December. Cuenca, 2015.
- [19] S. Rashidi, J. A. Esfahani, and A. Rashidi, “A review on the applications of porous materials in solar energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. June 2016, pp. 1198–1210, 2017.
- [20] BP statistical review of world energy, *BP statistical review of world energy*

2019., 68th ed. London: BP Statistical Review of World Energy, 2019.

- [21] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2016, pp. 894–900, 2018.
- [22] M. Nuñez *et al.*, “Study of Perceptions on Clean Estudio de Percepción sobre Energía Limpia y Auto Sostenible,” *IJMSOR*, vol. 3, no. 1, pp. 11–15, 2018.
- [23] V.-R. Diego and F. Ordóñez, “Mapa solar del Ecuador 2019,” Quito, 2019.
- [24] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad, “Atlas Solar Del Ecuador Con Fines De Generación Eléctrica,” *Corporación para la Investig. Energética*, p. 51, 2008.
- [25] M. Martínez, “Radiación Solar - Conceptos y aplicaciones,” no. 2006, pp. 1–4, 2016.
- [26] Coordinación de Energías Renovables Dirección Nacional de Promoción Subsecretaría de Energía Eléctrica, “Energía Renovables 2008 - Energía Solar,” Buenos Aires, 2008.
- [27] Solar Payback, “Calor Solar Para la Industria (México),” *Sol. Payback*, p. 76, 2018.
- [28] J. P. Muñoz-Vizhñay, M. V. Rojas-Moncayo, and C. R. Barreto-Calle, “Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador,” *Ingenius. Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 1, no. 19, pp. 60–68, 2018.
- [29] I. O. Cervantes Ávila, “Diseño de un sistema de indicadores de gestión en la sede campestre del Club Castillo de Amaguaña,” p. 84, 2006.
- [30] “Castillo de Amaguaña,” 2019. [Online]. Available: <https://www.castillodeamaguana.com/>. [Accessed: 30-Dec-2019].
- [31] S. A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition,” *Sol. Energy Eng. Process. Syst. Second Ed.*, pp. 1–819, 2014.
- [32] East Penn Solar Pool Heating, “HOW A SOLAR POOL HEATING SYSTEM WORKS,” 2016. [Online]. Available: <http://www.eastpennsolar.com/howitworks.html>. [Accessed: 05-Jun-2020].

- [33] O. García Valladares *et al.*, *Aplicaciones térmicas de la energía solar*. 2017.
- [34] M. Ghazouani, M. Bouya, and M. Benaissa, “A new methodology to select the thermal solar collectors by localizations and applications,” *Proc. 2015 IEEE Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2015*, 2016.
- [35] S. Madala, “Stationary Nonimaging Concentrators—A Comprehensive Study and Design Improvements,” no. December, 2016.
- [36] S. N. Boemi, O. Irulegi, and M. Santamouris, *Energy performance of buildings: Energy efficiency and built environment in temperate climates*. 2015.
- [37] I. Sarbu, C. Sebarchievici, I. Sarbu, and C. Sebarchievici, *Chapter 3 – Solar Collectors*. 2017.
- [38] W. Platzer, “Estudio de Tecnologías Solar Térmica para Producción de Calor en la Industria,” pp. 1–44, 2016.
- [39] M. Imtiaz Hussain, C. Ménézo, and J. T. Kim, “Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 187, no. July, pp. 123–139, 2018.
- [40] M. A. Lozano, “COLECTORES SOLARES TÉRMICOS Área de Máquinas y Motores Térmicos,” no. April, 2019.
- [41] L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, “Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. August, p. 109318, 2019.
- [42] S. Pradhan and A. Belbase, “MATHEMATICAL FORMULAE AND METHODOLOGY FOR PERFORMANCE Subject : Heat Transfer SUBMITTED TO Mr . Malesh Shah Department of Mechanical Engineering,” no. August, 2019.
- [43] M. A. Sabiha, R. Saidur, S. Mekhilef, and O. Mahian, “Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1038–1054, 2015.
- [44] M. J. Muhammad, I. A. Muhammad, N. A. Che Sidik, and M. N. A. W.

- Muhammad Yazid, “Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 6–15, 2016.
- [45] K. Hudon, “Solar Energy - Water Heating,” *Futur. Energy Improv. Sustain. Clean Options our Planet*, pp. 433–451, 2013.
- [46] K. Hudon, T. Merrigan, J. Burch, and J. Maguire, “Low-Cost Solar Water Heating Research and Development Roadmap,” *Contract*, vol. 303, no. August 2015, pp. 275–3000, 2012.
- [47] G. N. Tiwari, A. Tiwari, and Shyam, *Handbook of Solar Energy : Theory, Analysis and Applications*. 2018.
- [48] CIBSE Journal, “The terminology and concepts used to determine the magnitude and direction of incident solar radiation,” 2013. [Online]. Available: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2013-07/>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [49] J. A. Duffie (Deceased), W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. New Jersey, 2020.
- [50] Cámara de la construcción de Quito, “Norma Ecuatoriana De Construcción, Nec - 11,” *Capítulo 14 Energías Renov.*, p. 110, 2011.
- [51] G. M. Crawley, *Solar Energy*, vol. 2, no. 3673. WORLD SCIENTIFIC, 2016.
- [52] I. Yahyaoui, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 2. 2018.
- [53] J. G. Martínez and J. F. Asitimbay, “Caracterización Y Análisis Estadístico De La Radiación Solar Directa Para Aplicaciones De Media Y Alta Temperatura En Áreas Circundantes Al Ocp,” p. 300, 2015.
- [54] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, “Norma Ecuatoriana de la Construcción,” *Energías Renov.*, p. 164, 2020.
- [55] J. Calle - Sigüencia and O. Tinoco - Gómez, “Obtención de ACS con energía solar en el cantón Cuenca y análisis de la contaminación ambiental,” *Ingenius*, no. 19, pp. 89–101, 2018.

- [56] J. Zhao, J. I. Bilbao, E. D. Spooner, and A. B. Sproul, “Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions,” *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 320–335, 2018.
- [57] B. C. M. Jorge M. Hincapié Zapata, “Estudio teórico del comportamiento térmico de una piscina calentada con energía solar en Sogamoso, Colombia,” *Xxxix Sem. Nac. Energíasolar*, no. October, 2015.
- [58] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *HEAT AND MASS TRANSFER FUNDAMENTALS & APPLICATIONS*, Fifth Edit. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [59] G. Risso, M. Cutrera, M. Battioni, J. Schmidt, and M. Á. Lara, “CALEFACCION SOLAR DE UNA PISCINA A MUY BAJO COSTO,” *ASADES*, vol. 3, pp. 13–22, 2015.
- [60] Government of Canada, “RETScreen.” [Online]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>.
- [61] E. Ruiz and P. J. Martínez, “Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 116–123, 2010.
- [62] D. Kizildag, J. Castro, H. Kessentini, J. Rigola, and A. Oliva, “Development, optimization and test performance of highly efficient flat plate solar collector with transparent insulation and low-cost overheating protection,” *ISES Sol. World Congr. 2017 - IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2017, Proc.*, pp. 2031–2042, 2017.
- [63] Northern Lights Solar Water Heating Solutions, “Commercial Solar Heating.” [Online]. Available: <https://www.solartubs.com/>.
- [64] Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, “El 11 de julio rige nuevo mecanismo de fijación de precios de combustibles,” 2020. [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/el-11-de-julio-rige-nuevo-mecanismo-de-fijacion-de-precios-de-combustibles/>. [Accessed: 17-Dec-2020].

- [65] Global Petrol Prices, “Ecuador Precios del diesel,” 2020. [Online]. Available: [https://es.globalpetrolprices.com/Ecuador/diesel\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/Ecuador/diesel_prices/). [Accessed: 17-Dec-2020].
- [66] Pool Supply, “Ventajas del uso de un colector para piscina,” 2015. [Online]. Available: [https://www.poolsupplycr.com/ventajas-en-el-uso-de-un-cobertor-para-piscina/#:~:text=Los cobertores de piscina estándar,distintos residuos a su piscina](https://www.poolsupplycr.com/ventajas-en-el-uso-de-un-cobertor-para-piscina/#:~:text=Los cobertores de piscina estándar,distintos residuos a su piscina.). [Accessed: 17-Dec-2020].
- [67] F. Fernández Luna, “Piscinas climatizadas: La manta térmica,” Feb-2015.
- [68] Outlet Piscinas, “Mantas térmicas para piscinas,” 2021. [Online]. Available: [https://www.outlet-piscinas.com/cubiertas/mantas-termicas](https://www.outlet-piscinas.com/cubiertas/mantas-termicas.). [Accessed: 07-Feb-2021].
- [69] R. Aponte, F. Muñoz, and L. Álzate, “La evaluación financiera de proyectos y su aporte en la generación de valor corporativo,” *Cienc. y Pod. Aéreo*, vol. 12, no. 1, p. 144, Dec. 2017.

## ANEXOS

**Anexo 1** Los valores de los ángulos de declinación solar  $\delta_s$ , ángulo de altitud solar  $\alpha$ , ángulo zenit solar  $\theta_z$ , ángulo de la hora al atardecer  $h_{ss}$  y duración del día  $ld$  para cada día  $N$  promedio del mes. Elaborado por Carvajal-Mejía.

mes	fecha	N	$\delta_s$ [°]	$\alpha$ [°]	$\theta_z$ [°]	$h_{ss}$ [°]	$ld$ [horas]
Ene	17	17	-20.92	69.47	20.53	90.15	12.02
Feb	16	47	-12.95	77.44	12.56	90.09	12.01
Mar	16	75	-2.42	87.97	2.03	90.02	12.00
Abr	15	105	9.41	80.20	9.80	89.94	11.99
May	15	135	18.79	70.82	19.18	89.87	11.98
Jun	11	162	23.09	66.52	23.48	89.83	11.98
Jul	17	198	21.18	68.43	21.57	89.85	11.98
Ago	16	228	13.45	76.16	13.84	89.91	11.99
Sep	15	258	2.22	87.39	2.61	89.98	12.00
Oct	15	288	-9.60	80.79	9.21	90.07	12.01
Nov	14	318	-18.91	71.48	18.52	90.13	12.02
Dic	14	344	-23.05	67.34	22.66	90.17	12.02

**Anexo 2.** Radiación sobre una superficie horizontal. Elaborado por: Carvajal & Mejía.

<b>radiación sobre una superficie horizontal</b>							
<b>Ho</b>	<b>LD</b>	<b>H</b>	<b>kt</b>	<b>Hd/H</b>	<b>Radiación Difusa</b>	<b>Radiación Directa</b>	<b>Radiación Total</b>
3.64E+07	12.02	1.54E+07	0.422	0.442	6.8E+06	8.6E+06	1.5E+07
3.75E+07	12.01	1.58E+07	0.422	0.443	7.0E+06	8.8E+06	1.6E+07
3.79E+07	12.00	1.60E+07	0.423	0.443	7.1E+06	8.9E+06	1.6E+07
3.68E+07	11.99	1.56E+07	0.423	0.442	6.9E+06	8.7E+06	1.6E+07
3.48E+07	11.98	1.47E+07	0.423	0.442	6.5E+06	8.2E+06	1.5E+07
3.35E+07	11.98	1.42E+07	0.423	0.442	6.3E+06	7.9E+06	1.4E+07
3.39E+07	11.98	1.44E+07	0.423	0.442	6.3E+06	8.0E+06	1.4E+07
3.57E+07	11.99	1.51E+07	0.423	0.442	6.7E+06	8.4E+06	1.5E+07
3.72E+07	12.00	1.57E+07	0.423	0.443	7.0E+06	8.8E+06	1.6E+07
3.74E+07	12.01	1.58E+07	0.422	0.443	7.0E+06	8.8E+06	1.6E+07
3.64E+07	12.02	1.54E+07	0.422	0.443	6.8E+06	8.6E+06	1.5E+07
3.57E+07	12.02	1.51E+07	0.422	0.443	6.7E+06	8.4E+06	1.5E+07

### Anexo 3. Propiedades del aire a 1atm de presión.[58]

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

### Anexo 4. Propiedades del agua saturada [58]

Temp. T, °C	Saturation Pressure P <sub>sat</sub> , kPa	Density ρ, kg/m <sup>3</sup>		Enthalpy of Vaporization h <sub>fg</sub> , kJ/kg		Specific Heat c <sub>p</sub> , J/kg·K		Thermal Conductivity k, W/m·K		Dynamic Viscosity μ, kg/m·s		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient β, 1/K
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-5</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>	
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-5</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>	
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-5</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>	
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>	
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-5</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>	
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-5</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>	
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-5</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>	
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-5</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>	
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-5</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>	
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-5</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>	
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-5</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>	
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-5</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>	
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-5</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>	
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-5</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>	
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-5</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>	
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-5</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>	
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-5</sup>	2.22	1.00	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>	
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-5</sup>	1.96	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>	
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-5</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>	
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-5</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>	
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-5</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>	
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-5</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>	
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-5</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>	
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-5</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>	
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-5</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>	
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-5</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>	
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-5</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>	
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-5</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>	
200	1,553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-5</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>	
220	2,318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-5</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>	
240	3,344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-5</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>	
260	4,688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-5</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>	
280	6,412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-5</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>	
300	8,581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-5</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>	
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-5</sup>	1.00	1.97		
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-5</sup>	1.23	2.43		
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-5</sup>	2.06	3.73		
374.14	22,090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-5</sup>				

**Anexo 5.** Molar mass, gas constant, and ideal-gas specific heats of some substances Specific. [58]

Substance	Molar Mass <i>M</i> , kg/kmol	Gas Constant <i>R</i> , kJ/kg·K*	Specific Heat Data at 25°C		
			<i>c<sub>p</sub></i> , kJ/kg·K	<i>c<sub>v</sub></i> , kJ/kg·K	<i>k</i> = <i>c<sub>p</sub></i> / <i>c<sub>v</sub></i>
Air	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Ammonia, NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argon, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromine, Br <sub>2</sub>	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
Isobutane, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
<i>n</i> -Butane, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Carbon dioxide, CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Carbon monoxide, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Chlorine, Cl <sub>2</sub>	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Chlorodifluoromethane (R-22), CHClF <sub>2</sub>	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Ethane, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Ethylene, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluorine, F <sub>2</sub>	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helium, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptane, C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexane, C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hydrogen, H <sub>2</sub>	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Krypton, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Methane, CH <sub>4</sub>	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neon, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrogen, N <sub>2</sub>	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Nitric oxide, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Nitrogen dioxide, NO <sub>2</sub>	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Oxygen, O <sub>2</sub>	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentane, C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propane, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propylene, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Steam, H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Sulfur dioxide, SO <sub>2</sub>	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Tetrachloromethane, CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroethane (R-134a), C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroethane (R-143a), C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Xenon, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

## Anexo 6. Properties of building materials. [58]

Material	Thickness, $L$ mm	Density, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Thermal Conductivity, $k$ W/m-K	Specific Heat, $c_p$ kJ/kg-K	R-value (for listed thickness, $L/W$ ), K·m <sup>2</sup> /W
<b>Building Boards</b>					
Asbestos-cement board	6 mm	1922	—	1.00	0.011
Gypsum or plaster board	10 mm	800	—	1.09	0.057
	13 mm	800	—	—	0.078
Plywood (Douglas fir)	—	545	0.12	1.21	—
	6 mm	545	—	1.21	0.055
	10 mm	545	—	1.21	0.083
	13 mm	545	—	1.21	0.110
	20 mm	545	—	1.21	0.165
Insulated board and sheathing (regular density)	13 mm	288	—	1.30	0.232
	20 mm	288	—	1.30	0.359
Hardboard (high density, standard tempered)	—	1010	0.14	1.34	—
Particle board:					
Medium density	—	800	0.14	1.30	—
Underlayment	16 mm	640	—	1.21	0.144
Wood subfloor	20 mm	—	—	1.38	0.166
<b>Building Membrane</b>					
Vapor-permeable felt	—	—	—	—	0.011
Vapor-seal (2 layers of mopped 0.73 kg/m <sup>2</sup> felt)	—	—	—	—	0.021
<b>Flooring Materials</b>					
Carpet and fibrous pad	—	—	—	1.42	0.367
Carpet and rubber pad	—	—	—	1.38	0.217
Tile (asphalt, linoleum, vinyl)	—	—	—	1.26	0.009
<b>Masonry Materials</b>					
<i>Masonry units:</i>					
Brick, common		1922	0.72	—	—
Brick, face		2082	1.30	—	—
Brick, fire clay		2400	1.34	—	—
		1920	0.90	0.79	—
		1120	0.41	—	—
Concrete blocks (3 oval cores, sand and gravel aggregate)	100 mm	—	0.77	—	0.13
	200 mm	—	1.0	—	0.20
	300 mm	—	1.30	—	0.23
<i>Concretes:</i>					
Lightweight aggregates, (including expanded shale, clay, or slate; expanded slags; cinders; pumice; and scoria)		1920	1.1	—	—
		1600	0.79	0.84	—
		1280	0.54	0.84	—
		960	0.33	—	—
	940	0.18	—	—	—
Cement/lime, mortar, and stucco		1920	1.40	—	—
		1280	0.65	—	—
Stucco		1857	0.72	—	—

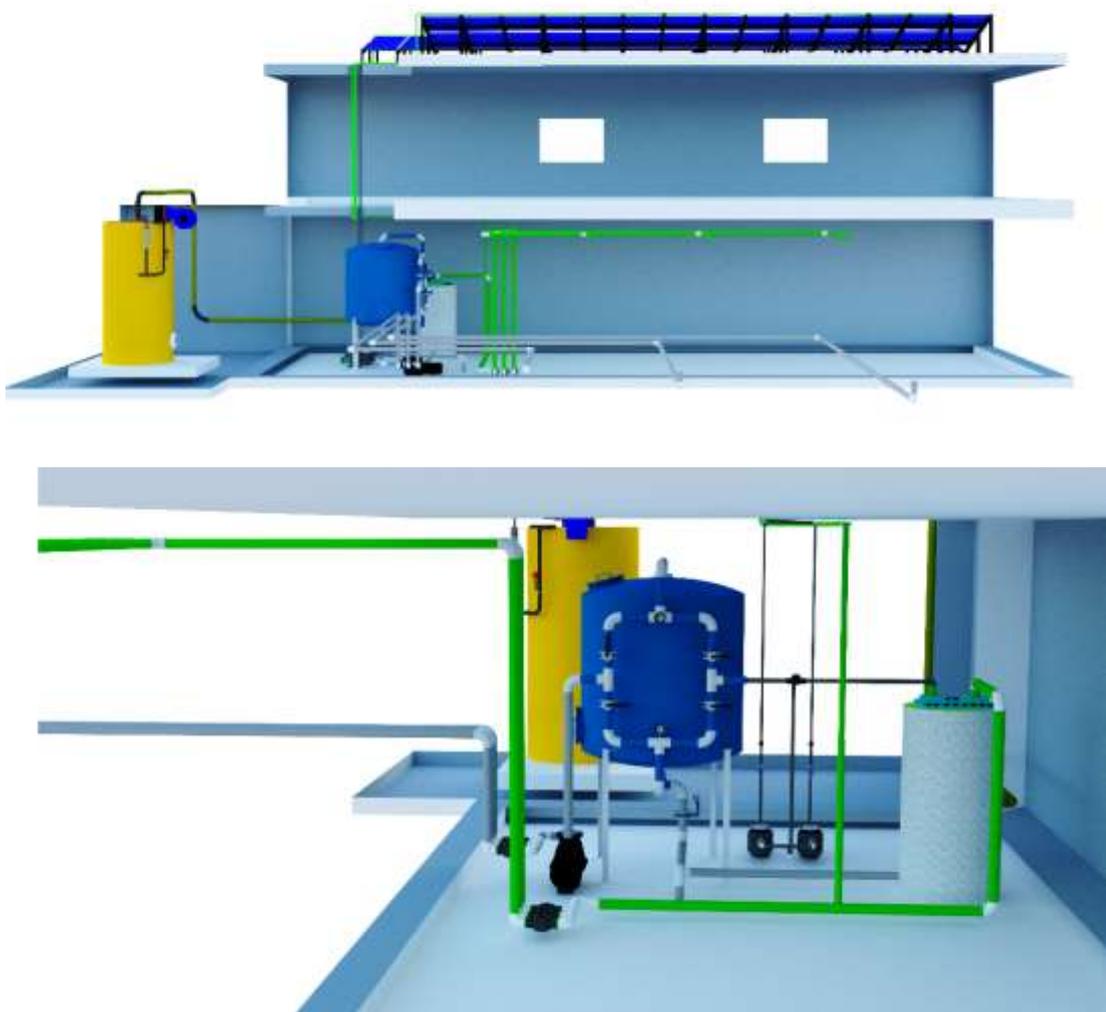
Anexo 7. Properties of miscellaneous materials. [58].

Material	Density, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Thermal Conductivity, $k$ W/m-K	Specific Heat, $c_p$ J/kg-K	Material	Density, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Thermal Conductivity, $k$ W/m-K	Specific Heat, $c_p$ J/kg-K
Asphalt	2115	0.062	920	Ice			
Bakelite	1300	1.4	1465	273 K	920	1.88	2040
Brick, refractory				253 K	922	2.03	1945
Chrome brick				173 K	928	3.49	1460
473 K	3010	2.3	835	Leather, sole	998	0.159	—
823 K	—	2.5	—	Linoleum	535	0.081	—
1173 K	—	2.0	—	1180	0.186	—	
Fire clay, burnt				2900	0.523	—	
1600 K				Paper	930	0.180	1340
773 K	2050	1.0	960	Plastics			
1073 K	—	1.1	—	Plexiglass	1190	0.19	1465
1373 K	—	1.1	—	Teflon			
1725 K				300 K	2200	0.35	1050
773 K	2325	1.3	960	400 K	—	0.45	—
1073 K	—	1.4	—	Lexan	1200	0.19	1260
1373 K	—	1.4	—	Nylon	1145	0.29	—
Fire clay brick				Polypropylene	910	0.12	1925
478 K	2645	1.0	960	Polyester	1395	0.15	1170
922 K	—	1.5	—	PVC, vinyl	1470	0.1	840
1478 K	—	1.8	—	Porcelain	2300	1.5	—
Magnesite				Rubber, natural	1150	0.28	—
478 K	—	3.8	1130	Rubber, vulcanized			
922 K	—	2.8	—	Soft	1100	0.13	2010
1478 K	—	1.9	—	Hard	1190	0.16	—
Chicken meat, white (74.4% water content)				Sand	1515	0.2–1.0	800
198 K	—	1.60	—	Snow, fresh	100	0.60	—
233 K	—	1.49	—	Snow, 273 K	500	2.2	—
253 K	—	1.35	—	Soil, dry	1500	1.0	1900
273 K	—	0.48	—	Soil, wet	1900	2.0	2200
293 K	—	0.49	—	Sugar	1600	0.58	—
Clay, dry	1550	0.930	—	Tissue, human			
Clay, wet	1495	1.675	—	Skin	—	0.37	—
Coal, anthracite	1350	0.26	1260	Fat layer	—	0.2	—
Concrete (stone mix)	2300	1.4	880	Muscle	—	0.41	—
Cork	86	0.048	2030	Vaseline	—	0.17	—
Cotton	80	0.06	1300	Wood, cross-grain			
Fat	—	0.17	—	Balsa	140	0.055	—
Glass				Fir	415	0.11	2720
Window	2800	0.7	750	Oak	545	0.17	2385
Pyrex	2225	1–1.4	835	White pine	435	0.11	—
Crown	2500	1.05	—	Yellow pine	640	0.15	2805
Lead	3400	0.85	—	Wood, radial			
				Oak	545	0.19	2385
				Fir	420	0.14	2720
				Wool, ship	145	0.05	—

## Anexo 8. Emissivities of surfaces. [58]

Material	Temperature, K	Emissivity, $\varepsilon$	Material	Temperature, K	Emissivity, $\varepsilon$
Aluminum			Magnesium, polished	300-500	0.07-0.13
Polished	300-900	0.04-0.06	Mercury	300-400	0.09-0.12
Commercial sheet	400	0.09	Molybdenum		
Heavily oxidized	400-800	0.20-0.33	Polished	300-2000	0.05-0.21
Anodized	300	0.8	Oxidized	600-800	0.80-0.82
Bismuth, bright	350	0.34	Nickel		
Brass			Polished	500-1200	0.07-0.17
Highly polished	500-650	0.03-0.04	Oxidized	450-1000	0.37-0.57
Polished	350	0.09	Platinum, polished	500-1500	0.06-0.18
Dull plate	300-600	0.22	Silver, polished	300-1000	0.02-0.07
Oxidized	450-800	0.6	Stainless steel		
Chromium, polished	300-1400	0.08-0.40	Polished	300-1000	0.17-0.30
Copper			Lightly oxidized	600-1000	0.30-0.40
Highly polished	300	0.02	Highly oxidized	600-1000	0.70-0.80
Polished	300-500	0.04-0.05	Steel		
Commercial sheet	300	0.15	Polished sheet	300-500	0.08-0.14
Oxidized	600-1000	0.5-0.8	Commercial sheet	500-1200	0.20-0.32
Black oxidized	300	0.78	Heavily oxidized	300	0.81
Gold			Tin, polished	300	0.05
Highly polished	300-1000	0.03-0.06	Tungsten		
Bright foil	300	0.07	Polished	300-2500	0.03-0.29
Iron			Filament	3500	0.39
Highly polished	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Case iron	300	0.44	Polished	300-800	0.02-0.05
Wrought iron	300-500	0.28	Oxidized	300	0.25
Rusted	300	0.61			
Oxidized	500-900	0.64-0.78			
Lead					
Polished	300-500	0.06-0.08			
Unoxidized, rough	300	0.43			
Oxidized	300	0.63			

**Anexo 9.** Vista del circuito hidráulico. Elaborado por Carvajal & Mejía.



**Anexo 10.** Instalación. Elaborado por Carvajal & Mejía



**Anexo 11.** Monitoreo. Elaborado por Carvajal & Mejía



**Anexo 12.** Equipos de monitoreo. Elaborado por Carvajal & Mejía



**Anexo 13.** Piscina con manta térmica. Elaborado por Carvajal & Mejía

