

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**“DISEÑO Y ESTUDIO OPERATIVO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR-
BIOGÁS PARA EL COMPLEJO ACUÁTICO DE LA UABC”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JOSÉ ARMANDO CORONA SÁNCHEZ

DIRECTOR:

DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

CO-DIRECTORES

DR. RICARDO LÓPEZ ZAVALA

Dedicatoria:

Quiero dedicar este trabajo a mis padres por las enseñanzas valores y educación brindada a lo largo de mi vida, a cada uno de mis hermanos por ser parte de mi motivación personal, así como a cada una de las personas que con su tributo aportaron a que fuera posible este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma Baja California. Por compartir gran parte de su conocimiento, experiencia, perspectiva e ideas creativas, ayudando a fortalecer un pensamiento autocrítico.

A los sínodos

Por su disponibilidad y profesionalismo al compartir su crítica constructiva durante la revisión objetiva de este trabajo.

Investigadores del Instituto de Ingeniería

Por formar parte de mi crecimiento profesional al compartir su conocimiento a lo largo de esta etapa.

Compañeros del CEENER

Por hacerme parte del equipo de trabajo y ofrecerme su opinión e ideas para mejorar.

Universidad Autónoma de Baja California

A través del Instituto de Ingeniería; Por el apoyo, tiempo de formación y facilidades recibidas durante el desarrollo de los estudios de maestría.

Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías

Por la beca otorgada para los estudios de maestría.

RESUMEN

El consumo de energía en las edificaciones con instalaciones deportivas como los complejos acuáticos, tienen un alto consumo energético directamente relacionado al sistema de calentamiento de agua, estos consumen del 30 al 45 % de la energía total consumida. En este trabajo se propone el diseño de un sistema híbrido que utilice las energías renovables como fuente de energía. Para ello, se desarrolló un modelo matemático para simular en TRNSYS el comportamiento térmico de una piscina a partir de las condiciones meteorológicas del lugar de ubicación. Planteando la creación de un nuevo módulo (Type) programado en MATLAB con el código del modelo de transferencia de calor. En la validación del modelo matemático, el margen de error promedio relativo de la temperatura simulada y la reportada por investigadores es de 0.0326 (3.2 %), RMSE = 0.08, MAE = 0.78 y un BIAS = -1.48 % y la mayor discrepancia se obtuvo en el segundo día con una diferencia en las temperaturas de 1.79 °C. Por lo tanto, el modelo reproduce adecuadamente la temperatura del vaso de agua de la piscina bajo las condiciones ambientales del recinto, por lo que se puede utilizar como una herramienta confiable para generar análisis técnicos y económicos de sistemas de calefacción (termosolar, bombas de calor, calderas, etc.) para complejos acuáticos a partir del comportamiento térmico que tenga el sistema. Posteriormente de la validación, se hicieron simulaciones operativas para el caso base, el cual mostró un pico en el consumo energético en el mes de diciembre, sin embargo, este no empató con el máximo de costo de operación mensual, ya que el precio del gas sufre un incremento cerca del 10 % en el mes de enero lo cual produjo un costo de 202,725 \$/mes. También, se simularon las configuraciones con diferentes áreas de captación termosolar con el fin de evaluar su aportación de energía térmica, también llamada fracción solar. En el estudio de viabilidad económica se sometieron las propuestas que se simularon, por lo que se obtuvieron sus costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, para determinar sus tiempos de retorno de inversión. La configuración con un área captación de 240 m² muestra un

tiempo de recuperación de 3 años, alcanzando una fracción solar anual mayor al 40 % y un ahorro de \$328,500 al año. Además, cumple con los requerimientos de la norma (NADF-008-AMBT-2017), que establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en instalaciones y solicita que, para un edificio con las características del complejo acuático, le corresponde el 40 % de aportación solar de la demanda térmica total que necesita el edificio.

ABSTRACT

Energy consumption in buildings with sports facilities such as aquatic complexes, have a high energy consumption directly related to the air conditioning system of water vessels, these consume 30 to 45% of the total energy consumed. This work proposes the design of a hybrid system that uses renewable energies as a source of energy. However, there is no tool to determine the thermal demand that would be required, nor is there a history of the energy consumption of the current air conditioning system. This information is necessary for the correct sizing of the system. For this purpose, a mathematical model was developed to simulate in TRNSYS the thermal behavior of a swimming pool based on the meteorological conditions of the location. We proposed the creation of a new module (Type) programmed in MATLAB with the code of the heat transfer model. The average relative error margin of the temperature predicted by the model within the pool compared to the measured values is 0.0326 (3.2 %), RMSE = 0.08, MAE = 0.78 y un BIAS= -1.48 % and the largest discrepancy was obtained on the second day with a difference in temperatures of 1.79. Therefore, the model adequately reproduces the temperature of the pool water under the ambient conditions of the enclosure, so it can be used as a reliable tool to generate technical and economic analysis of heating systems (solar thermal, heat pumps, boilers, etc.) for aquatic complexes based on the thermal behavior of the system. Once the heat transfer model of the pool was validated, operational runs were made for the base case, which showed a peak in energy consumption in the month of December, however this did not match the maximum monthly operating cost, since the price of gas suffered an increase of about 10% in the month of January which produced a higher cost in this month of \$202,725/month, The configuration with an area of 240 m² achieved an increase in the solar fraction of 8% while achieving an annual contribution of more than 40%, which for Mexico City is the minimum required for the characteristics of this building according to the standard. In the economic feasibility study, the proposals that were simulated were submitted and their initial investment, operation and maintenance costs were obtained in order to determine their return on investment times. The hybrid system of 30 branches shows a payback time of 3 years and meets the requirements of the standard (NADF-008-AMBT-2017), which establishes the technical specifications for the use of solar energy for water heating in facilities and requests that for a building with the characteristics of the aquatic complex, 40% of the total thermal demand of the building should be provided by solar energy.

ÍNDICE GENERAL

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TESIS.....	12
--------------------------------------	----

1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN.....	15
1.2 ANTECEDENTES	18
1.2.1 Sistemas pasivos para la climatización de piscinas	18
1.2.2 Sistemas activos para la calefacción de piscinas	19
1.3 HIPÓTESIS.....	28
1.4 OBJETIVOS	28
1.4.1 Objetivo general	28
1.4.2 Objetivos específicos.....	28
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	30
2.1.1 Conducción.....	30
2.1.2 Convección	31
2.1.3 Radiación.....	32
2.2 BIOMASA	33
2.2.1 Procesos de conversión energética de la biomasa	33
2.2.2 Biogás	35
2.3 ENERGÍA SOLAR.....	37
2.3.1 Naturaleza solar	37
2.3.2 Radiación solar	39
2.3.3 Disponibilidad del recurso solar en México	41
2.3.4 Energía solar térmica	42
2.3.5 Colectores solares utilizados en calentamiento de piscinas.....	43

3 ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	47
ACTUAL DE LA PISCINA.....	47
3.1 ESTUDIO TÉRMICO DE LA PISCINA	47
3.1.1 Descripción física y operativa	47
3.1.2 Metodología para la simulación térmica de la piscina.....	49
3.1.3 Validación del modelo de transferencia de calor para una piscina.....	53
3.1.4 Análisis del comportamiento térmico de la piscina.....	57
3.2 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	59
CON CALDERA	59
3.2.1 Descripción física y operativa	59
3.2.2 Metodología para la simulación operativa.....	60
3.2.3 Análisis térmico y operativo del sistema de calefacción con caldera.....	65
4 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PROPUESTAS DE CALEFACCIÓN CON ENERGÍA SOLAR Y BIOGÁS PARA LA PISCINA	67
4.1 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	67
TERMOSOLAR.....	67
4.1.1 Descripción física y operativa	67
4.1.2 Metodología para la simulación operativa.....	68
4.1.3 Análisis térmico y operativo del sistema termosolar	72
4.2 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	74
TERMOSOLAR-BIOGÁS	74
4.2.1 Descripción física y operativa	74
4.2.2 Metodología para la simulación operativa.....	75

4.2.3	Análisis térmico y operativo del sistema híbrido (Termosolar-biogás)	75
	4.3 DISEÑO DE LA RED HIDRÁULICA	79
4.3.1	Ramaleos y diámetros de tubería	79
4.3.2	Accesorios de seguridad y mantenimiento	79
4.3.3	Elementos de interconexión, soporte y fijación.....	82
4.3.4	Dimensionamiento y selección de la bomba	83
	5 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA	87
	5.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE	87
	CALEFACCIÓN TERMOSOLAR-BIOGÁS	87
5.1.1	Costo de inversión inicial	87
5.1.2	Costo de operación y mantenimiento	88
5.1.3	Indicadores económicos (TRI, TIR Y VPN)	90
	6 ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN	92
6.1	PUESTA EN MARCHA	92
6.2	MODO HIBRIDO.....	93
6.3	MODO SOLAR TÉRMICO	100
6.4	MODO INACTIVO	102
	7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
7.1	CONCLUSIONES	104
7.2	RECOMENDACIONES.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estimación de crecimiento de la población mundial.....	17
Figura 1.2. Tipos de mantas térmicas: (a) capa simple; (b) con aire; y (c) con burbujas de aire.	20
Figura 1.3. Tipos de cubiertas para piscinas que se utilizaron en el estudio de Wache et al., 2020.	21
Figura 1.4. Diagrama de un sistema de calentamiento de piscina solar	22
Figura 1.5. Configuración del sistema de climatización solar para piscina propuesto en el estudio de Van Zyl (2000)	24
Figura 1.6. Sistema de calentamiento de agua para piscina exterior con PV/T. 26	
Figura 1.7. Sistema híbrido (PV/T) sumergido en una piscina.	27
Figura 1.8. Vista aérea de la piscina y su mapa de sombra en porcentajes.	28
Figura 1.9. Sistema de calefacción para piscina activado con biomasa.	29
Figura 2.1. Diagrama de transferencia de calor por conducción	32
Figura 2.2. Transferencia de calor por convección	33
Figura 2.3. Fenómeno de radiación térmica en dos superficies	34
Figura 2.4 Composición del biogás.	38
Figura 2.5. Estructura del sol.	40
Figura 2.6. Mapa de recurso solar en México	43
Figura 2.7. Curva de eficiencia para algunos tipo de captadores estacionarios.	45
Figura 2.8. Colector polipropileno de baja densidad.	46
Figura 2.9. Descripción física del colector placa plana.	47
Figura 2.10. Tipos de colectores de tubos evacuados.	48
Figura 3.1. Diagrama de flujo para el modelo matemático propuesto.	52
Figura 3.2. Esquema con las principales variables del sistema.	53
Figura 3.3. Instrumento de medición de las variables meteorológicas.	54
Figura 3.4. Registro de la velocidad de viento Alicante, España.	56
Figura 3.5. Comportamiento de las variables ambientales (T_{amb} , HR, G).	56
Figura 3.6. Comportamiento de la temperatura de la piscina.	57
Figura 3.7. Diferencia de la temperatura predicha y la temperatura observada	

(error absoluto).	58
Figura 3.8. Demanda de energía térmica (para una $T_p = 24\text{ °C}$) y perfil de la temperatura sin calentamiento.	60
Figura 3.9. Diagrama del sistema de climatización por medio de la caldera. ...	61
Figura 3.10. Diagrama de flujo de la metodología de simulación.	62
Figura 3.11. Módulo para el archivo climatológico.	62
Figura 3.12. Componente que representa la piscina.	63
Figura 3.13. Bomba de circulación	64
Figura 3.14. Componente que representa una válvula de desviación.	64
Figura 3.15. Type de la caldera.	64
Figura 3.16. Type del control PID.	65
Figura 3.17. Generación de energía térmica a través de la caldera de gas LP. ..	66
Figura 4.1. Diagrama del sistema de calefacción termosolar.	69
Figura 4.2. Diagrama de flujo de la metodología de simulación.	70
Figura 4.3. Aporte de energía térmica del campo de colectores.	74
Figura 4.4. Diagrama del sistema termosolar- biogás.	75
Figura 4.5. Fracción solar para diferentes tamaños del campo de colectores solares.	77
Figura 4.6. Consumo de biogás del sistema propuesto con 60% biogás.	79
Figura 4.7. Cálculo para determinar los diámetros de tuberías para cada ramal.	80
Figura 4.8. a) Válvula liberadora de aire, y b) Válvula de alivio de presión.	81
Figura 4.9. Válvula de drenaje o drenado.	81
Figura 4.10. Válvulas de corte por banco (serie).	82
Figura 4.11. Distribución de válvulas para cada banco o serie.	82
Figura 4.12. Cálculo de sombra para colectores solares.	83
Figura 4.13. Diagrama de tuberías del campo de colectores de 30 series.	84
Figura 4.14. Curva de operación de la bomba GNA5-1¼	87

Figura 5.1. Proporción del costo por elemento de la inversión inicial.	88
Figura 5.2. Gráfica del costo de operación para las diferentes configuraciones.	90
Figura 5.3. Comportamiento de los indicadores estadísticos (VPN y TRI).	92
Figura 6.1. Dinámicas en el modo de operación puesta en marcha.	93
Figura 6.2. Comportamiento de la semana crítica de enero.	95
Figura 6.3. Generación de calor en la semana crítica de enero.	96
Figura 6.4. Pérdidas de calor (Q_{cv} y Q_{evap}) en la semana crítica de febrero.	97
Figura 6.5. Generación de calor en la semana crítica de febrero.	98
Figura 6.2. Comportamiento de las pérdidas de calor y variables climatológicas en la semana crítica de diciembre.	99
Figura 6.7 Generación de energía térmica del sistema de calefacción en una semana de diciembre.	100
Figura 6.8 Pérdidas de calor (Q_{cv} y Q_{evap}) en la piscina en la semana de octubre.	101
Figura 6.9 Contribución de energía térmica del campo de colectores en una semana de octubre.	102
Figura 6.10 Comportamiento térmico de la piscina durante el año.	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Equipos del sistema hidráulico	51
Tabla 3.2. Ecuaciones del modelo de transferencia de calor de la piscina	53
Tabla 3.3. Valores iniciales de los datos de entrada y parámetros.	55
Tabla 3.4. Indicadores estadísticos de la validación.	57
Tabla 3.5. Temperaturas diarias de cada mes	59
Tabla 3.6. Demanda promedio diaria de cada mes	60

Tabla 3.7. Datos de entrada type piscina.....	63
Tabla 3.8. Parámetros fijos de la piscina.....	63
Tabla 3.9. Datos de entrada de la bomba de la caldera	64
Tabla 3.10. Datos de entrada de la caldera	65
Tabla 3.11. Parámetros fijos de la caldera	65
Tabla 3.12. Datos de entrada para el control PID de la caldera	65
Tabla 3.13. Desempeño energético y consumo de la caldera	67
Tabla 4.1. Datos de entrada del colector solar	71
Tabla 4.2. Datos de entrada de la bomba de los colectores	72
Tabla 4.3. Datos de entrada del control por diferencia de temperaturas	72
Tabla 4.4. Datos de entrada para el control PID	73
Tabla 4.5. Desempeño energético de la piscina y el campo de colectores	74
Tabla 4.6. Aportación solar para diferentes áreas de captación	78
Tabla 4.7 Demanda de biogás anual	79
Tabla 5.1. Costos para el cálculo de la inversión inicial	89
Tabla 5.2. Costo de inversión inicial	89

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
A	Área	m ²
C	Calor específico J/(kg·K)	
D	Diámetro de tubería	m
F	Factor de fricción de Darcy	(—)
G	Flujo de irradiación solar	W/m ²
G	Gravedad	m/s ²
H	Coefficiente de transferencia de calor	W/(m ² ·K)
HL	Pérdida de carga	m
K	Pérdidas menores de carga	m
K	Conductividad térmica	W/m·K
L	Longitud	m
M	Flujo másico	kg/s
NPSH	Net positive suction head	m
PCI	Poder calorífico inferior	J/kg

Pp	Presión parcial	Pa
Ps	Presión de saturación	Pa
Q	Calor	W
T	Temperatura	°C
T	Tiempo	s
TIR	Tasa interna de retorno	%
TRI	Tiempo de recuperación de la inversión	años
V	Volumen m ³	
VPN	Valor presente neto	\$
W	Velocidad de viento m/s	
A	Absortividad superficial	(—)
E	Emisividad	(—)
Z	Altura	m

Subíndices Símbolo

Definición

A	Ambiente
Cn	Conducción
Cv	Convección
E	Evaporación
G	Ganancias
P	Vaso de agua o piscina
R	Radiación
Rf	Renovación de agua
S	Suelo
Sky	Cielo
W	Agua

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TESIS

En este apartado se describen a manera de resumen cada capítulo, sintetizando a grandes rasgos los puntos claves de cada uno de los capítulos de tesis.

Capítulo 1: En el primer capítulo se hace un planteamiento general del tema de investigación y se contextualiza a través de la descripción de la problemática. Seguido de una serie de antecedentes que afirman el uso de las tecnologías renovables para sistemas de calentamiento en piscinas, demostrando pertinencia y justificación en el proyecto. Posteriormente se define una hipótesis y los objetivos generales, así como los objetivos específicos. La estructura de la redacción de la problemática parte de una visión global a una particular.

Capítulo 2: Este capítulo muestra los fundamentos teóricos necesarios para comprender los fenómenos que rigen las tecnologías propuestas por lo tanto se describen en 3 subtemas: las formas de transferir calor, conceptos de la biomasa y por último, la energía solar térmica.

Capítulo 3: Se describe de manera detallada la metodología que se desarrolló para el modelo matemático de transferencia de calor de la piscina, su validación y los resultados de los cálculos del comportamiento térmico de la piscina. En otra sección de este mismo capítulo se describe física y operativamente el sistema de calefacción de caldera con el que cuenta el complejo acuático de la UABC en la ciudad de Mexicali, México. Seguimiento de la metodología para una simulación operativa y sus resultados con el objetivo de determinar el consumo de energía del sistema propuesto.

Capítulo 4: En el capítulo 4 se presenta una descripción de las propuestas, su metodología de simulación para terminar con los resultados de las simulaciones operativas y consideraciones del análisis de sensibilidad efectuado al sistema de calefacción, para el diseño óptimo según la demanda térmica requerida por la piscina. A través de las gráficas se explican los comportamientos del sistema frente a diferentes perturbaciones que pudieran surgir en una operación real.

Capítulo 5: El contenido de este capítulo se centra en los indicadores que se calcularon para el estudio de factibilidad económica de las configuraciones de las propuestas. Los indicadores que se calcularon son el valor presente neto (VPN), tiempo de recuperación de la inversión (TRI) y tasa interna de retorno (TIR).

Capítulo 6: Las simulaciones operativas permitieron proponer algunos modos o estrategias de operación para el sistema híbrido (60 % biogás) que presento resultados favorables economicamente. Primeramente, se presenta una simulación de la puesta en marcha para el sistema de calefacción, que describe el comportamiento térmico, es decir cuantos días requiere el sistema de calefacción para llegar a la temperatura de consigna. Considerando que al inicio la temperatura de la piscina es la misma que la de la red (Temperatura de la red = 15.5 °C, en los meses de invierno). Después se analizó la operación del sistema en el modo híbrido en la

temporada con mayor demanda (enero, febrero y diciembre), mostrando el aporte del sistema termosolar. Así como las tendencias de las principales pérdidas de calor que tiene la piscina con el ambiente. Otra de las estrategias de operación, es cuando el sistema termosolar es capaz de cubrir el 100 % de las necesidades térmicas de la piscina, esto sucede en los meses de abril y septiembre, ya que la demanda de energía térmica y el potencial solar disponible favorecen la producción de energía termosolar. Finalmente, se encuentra el modo inactivo consecuencia de una nula demanda de energía térmica en la piscina.

Capítulo 7: En este capítulo se establecen las conclusiones y recomendaciones que se originaron a partir de los resultados de las simulaciones.

Capítulo 1

1 INTRODUCCIÓN

La energía es una necesidad fundamental para el desarrollo y progreso del ser humano en todos los aspectos de su vida. Desde los albores de la civilización, los seres humanos han buscado formas de obtener y utilizar energía para satisfacer sus necesidades básicas, así como para mejorar su calidad de vida. Sin embargo, el crecimiento de la población mundial y el aumento de la demanda energética plantean desafíos significativos en términos de seguridad energética y sostenibilidad ambiental. La necesidad de encontrar fuentes de energía más limpias, renovables y eficientes se vuelve cada vez más apremiante.

En los complejos acuáticos el consumo de energía es una preocupación importante debido a varios factores. En primer lugar, la mayoría de estos lugares requieren una gran cantidad de agua caliente para mantener las piscinas a una temperatura agradable para los visitantes. Esto implica la utilización de sistemas de calentamiento, como calderas o intercambiadores de calor, que consumen una cantidad considerable de energía. Además, los complejos acuáticos están equipados con sistemas de filtración y bombeo de agua para mantener el agua limpia y en condiciones adecuadas para su uso. Estos sistemas funcionan constantemente para filtrar y

desinfectar el agua, lo que implica el uso de bombas y motores que consumen energía eléctrica de manera continua.

Dada la creciente conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad y la conservación de energía, muchos complejos acuáticos están adoptando medidas para reducir su consumo energético. Esto puede incluir la instalación de sistemas de energía solar o térmica para el calentamiento del agua, la implementación de sistemas de iluminación eficientes, el uso de equipos de filtración y bombeo de agua de alta eficiencia energética, y la adopción de políticas de uso responsable de la energía.

En este trabajo se propone un sistema termosolar-biogás para el calentamiento del agua, reduciendo los costos de operación y la huella de carbono del complejo acuático de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Para ello, en una primera estancia se realizó una investigación bibliográfica para tener un contexto sobre la temática y poder proponer un sistema de calefacción activado con fuentes renovables. El sistema propuesto fue simulado en el programa de TRNSYS para observar el desempeño operativo y determinar costos de operación. Seguido de un análisis económico con el objetivo de determinar la configuración del sistema que presente mejores indicadores económicos. Demostrando que los sistemas de calefacción activados con energía renovable tienen una pertinencia no solo técnica, sino también económica y ambiental.

1.1 PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

Los datos históricos de las estimaciones y proyecciones sobre la evolución de la población mundial, pueden tener ciertas imprecisiones pero todas siguen una misma tendencia que es muy marcada. En 2050, se proyecta que el crecimiento de la población de nuestro planeta ascenderá a 9,700 millones de personas (Figura 1.1). Asimismo, según la proyección del informe de la ONU (ONU, 2019), muestra que para finales del siglo XXI la población mundial alcanzara los 11,000 millones de personas. El crecimiento poblacional ha causado una mayor demanda de recursos para satisfacer nuestras necesidades y/o satisfacciones materiales, aún más en los países que utilizan como motor económico el consumismo, generando hábitos de una sociedad de consumo. Es decir, a mayores ingresos económicos, mayor poder adquisitivo, mayor consumo, y por lo tanto mayor cantidad de residuos (Nakasima, 2015).

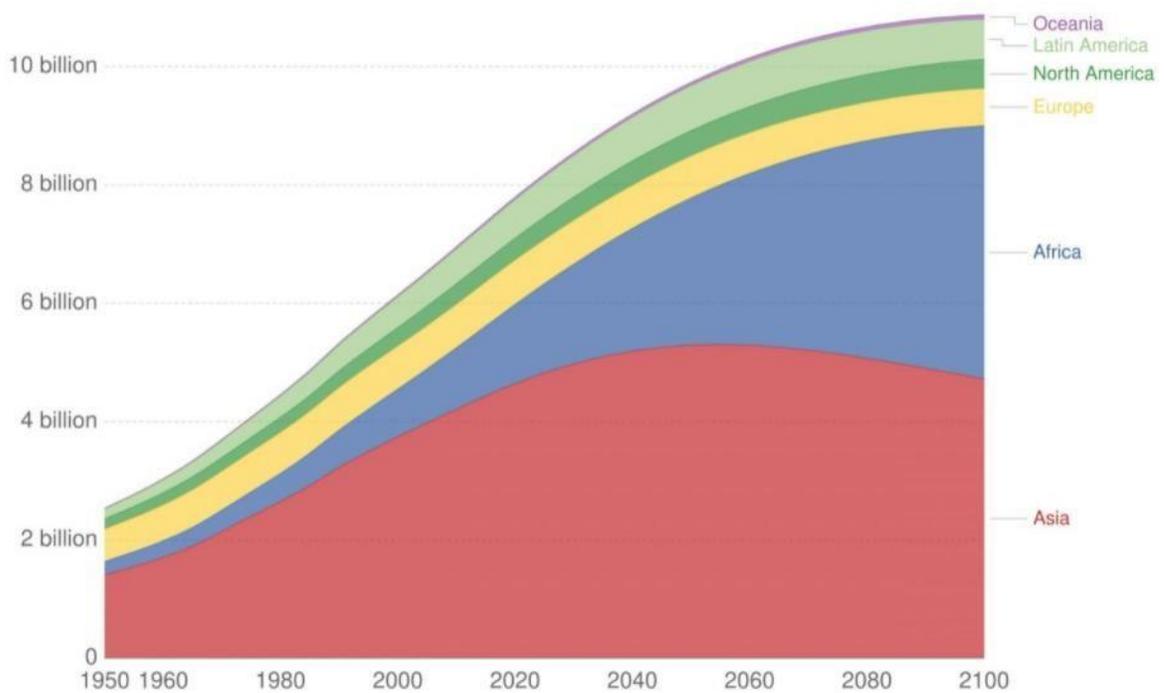


Figura 1.1. Estimación de crecimiento de la población mundial.

Fuente: UN, World Population Prospects (2022)

Este incremento, principalmente en el consumo de servicios y productos, como es el caso del consumo de energía provoca un mayor interés y preocupación a nivel ambiental, económico, político y social. Debido a las dificultades de abastecimiento, el agotamiento de los recursos y de la capa de ozono, calentamiento global y cambio climático. La contribución global de los edificios al consumo de energía, tanto residencial como comercial, no ha dejado de incrementar hasta alcanzar cifras entre el 20% al 40 % (EIA, 2022), sin dejar a un lado las grandes cantidades de residuos que se generan dentro de estas. En México, las edificaciones consumen el 25.4 % del total de electricidad utilizada en el país (Sheikhi et al., 2016) y generan diariamente 102,895 toneladas de residuos urbanos, de los cuales se recolectan 83.93% y se depositan en sitios de disposición final 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los residuos generados (SEMARNAT, 2017). Para el caso de Mexicali, B.C., México en el año 2010 se tenían registrados 936, 826 habitantes, cerca del 30% del total de la población del estado (INEGI, 2010) y la generación de residuos sólidos orgánicos en el sector residencial eran aproximadamente de 58.26%, de los cuales están compuestos principalmente por residuos de alimentos y poda de jardín, que corresponde a 470 toneladas diarias (0.501 kg/día per cápita). Actualmente, existen opciones tecnológicas como los biodigestores, para reducir los efectos negativos que ocasionan la mala gestión de los residuos orgánicos. Los cuales tienen

potencial para generar biogás, a través de un proceso llamado digestión anaeróbica. Y aprovechar los beneficios de utilizar biogás, tales como: reducción de emisiones, tratamiento de residuos, generación de energía, mejora de la calidad del suelo agrícola, e independencia energética. El uso de biogás ofrece una serie de beneficios ambientales, sociales y económicos al proporcionar un biocombustible.

Las edificaciones que cuentan con una mayor demanda energética son las instalaciones deportivas, y entre las que más destacan son los complejos acuáticos, debido al alto consumo de energía eléctrica para el calentamiento del agua, funcionamiento de las bombas de recirculación, ventilación y calefacción del espacio (Kampel et al. 2013). El perfil del uso anual de energía de una piscina varía de 600 kWh/m^2 a 6000 kWh/m^2 , en relación con el volumen y la superficie del vaso de agua, el horario de funcionamiento y condiciones meteorológicas del lugar (Trianti-Stourna et al. 1998). El complejo acuático con el que cuenta la UABC, tiene una alta facturación en el costo de operación del sistema de calentamiento de agua que ronda los \$800,000.00 al año, sin dejar a un lado el daño ambiental que causa.

Además, que los costos de combustibles fósiles tienen una tendencia al incremento. Mientras que la tasa de generación de residuos sólidos para el Campus Mexicali I de la UABC en promedio, fue de 1 tonelada al día tomando en cuenta los desechos de tres fuentes: edificaciones, jardines y centro comunitario. En el caso de los desechos generados en la poda de jardines, el 80 % son residuos sólidos orgánicos (RSO), mientras que para el centro comunitario un 54 %, proveniente de los desechos de alimento y finalmente para las edificaciones solo un 10 % corresponde a RSO (Armijo de Vega et al. 2008). Lo que demuestra una disponibilidad del recurso biomásico en el campus universitario para la producción de biogás.

Una de las maneras de resolver esta problemática, es la implementación de sistemas de calentamiento de agua activados con fuentes de energía renovable (solar y biomasa) para las instalaciones con piscinas, disminuyendo el consumo de energía eléctrica obteniendo por ende un menor costo de facturación y contribuyendo en la mejora del medio ambiente, reduciendo el consumo de combustibles fósiles que se refleja en una menor huella de carbono.

Es por ello que, en este trabajo de investigación se busca reemplazar los combustibles fósiles utilizados para climatizar la piscina olímpica de la UABC en la temporada de invierno, con el uso de tecnologías basadas en fuentes de energías renovables. Trayendo ahorros económicos

en los costos de operación y una reducción en la huella de carbono del sistema. Volviéndose un sistema de climatización más sostenible ambientalmente, causando un valor adicional a la propiedad ofreciendo beneficios ambientales, económicos y de salud significativos.

1.2 ANTECEDENTES

A continuación, se presenta un resumen de los distintos estudios que se han hecho a lo largo del tiempo sobre diferentes sistemas pasivos y activos de climatización para piscinas. Las tecnologías activas de calentamiento analizadas en este documento, provienen de energía solar y biomasa, mientras que las pasivas se basan en cubiertas o mantas térmicas para aislar o ganar calor dependiendo de las propiedades del material.

1.2.1 Sistemas pasivos para la climatización de piscinas.

El uso de una manta térmica o cubierta de aislamiento térmico, es la técnica pasiva más utilizada para prevenir pérdidas de calor, principalmente en lo respecta al fenómeno evaporación. De manera que reduce la carga térmica sin utilizar energía eléctrica o combustible, por lo que entra en la clasificación de técnica de calefacción pasiva. En 1955, Brooks (1955) fue quien propuso utilizar cubiertas para piscinas por primera vez, cinco años después Root (1960) planteó el uso de una cubierta de plástico inflable para que flotara en la superficie de la piscina, mientras esta no está en funcionamiento. Para retirarla, podría desinflarse y enrollarse para su almacenamiento mientras la piscina está en uso. Czarnecki (1963) reportó el rendimiento térmico de una cubierta inflada de cloruro de polivinilo con 0.02 cm de espesor, en una piscina exterior localizada en Melbourne, Australia. Sin embargo, el autor concluyó que la resistencia térmica que representa la cubierta no era satisfactoria y sugirió el uso de una de 0.05 cm de espesor. En la figura 1.2 se ilustran los diferentes tipos de mantas térmicas que se evaluaron en los estudios mencionados anteriormente.

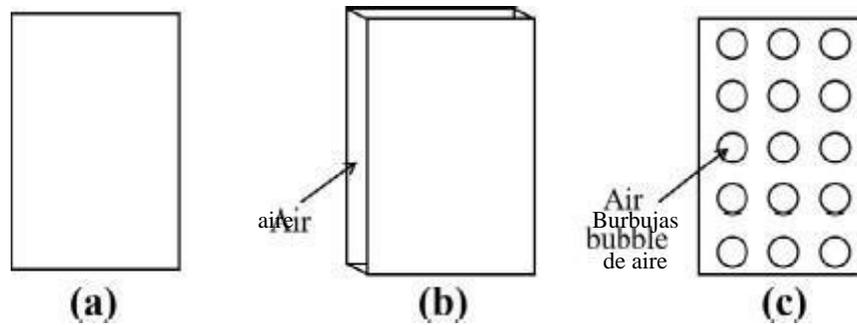


Figura 1.2. Tipos de mantas térmicas: (a) capa simple; (b) con aire; y (c) con burbujas de aire. Investigadores en el 2020 reportaron el desarrollo de un innovador material compuesto por polietileno con pigmentos masterbatch. En la figura 1.3 se muestra una comparación visual de las cubiertas (transparente, opaca y selectiva). Cada una de ellas con una capacidad diferente para filtrar la energía del sol para la fabricación de cubiertas térmicas de piscinas debido a que la radiación solar en el espectro visible es absorbida por el material, por lo tanto, entra una mínima cantidad de luz visible lo que inhibe la fotosíntesis evitando el crecimiento de algas. Además, este material tiene propiedades de alta transmisión en el rango del infrarrojo, de modo que el agua absorbe esta energía irradiada permitiendo un aumento en la temperatura del agua dentro de la alberca (Waché et al., 2020).

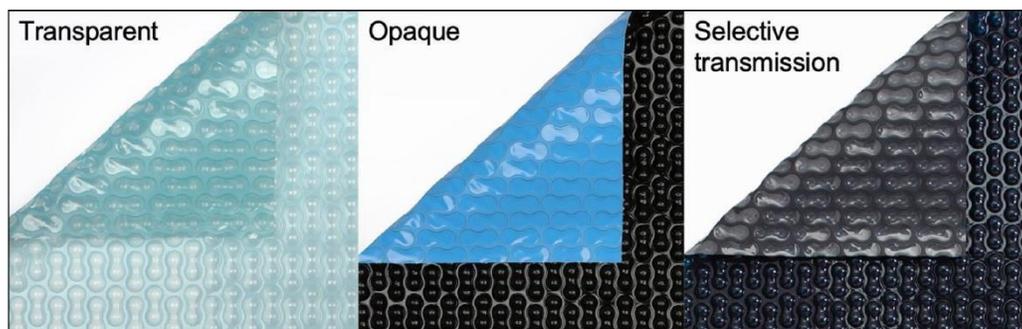


Figura 1.3. Tipos de cubiertas para piscinas que se utilizaron en el estudio de Wache et al., 2020.

1.2.2 Sistemas activos para la calefacción de piscinas

Estos sistemas de calefacción para piscinas exteriores, se basan en mantener la temperatura del vaso de agua dentro de un rango de confort térmico entre 21 °C a 28 °C (Lugo et al. 2019) adecuado para el usuario, y están diseñados para satisfacer su demanda de calentamiento en la temporada de invierno.

□ Colectores solares

Los colectores solares son ampliamente utilizados en los sistemas de calentamiento de agua para piscinas, debido a su potencial de ahorrar en la facturación de los costos de operación (costos de combustible), volviéndose económicamente atractivos. En la figura 1.4, se visualiza un sistema de calentamiento solar para una piscina en el interior de una edificación. El sistema cuenta con un sistema de captación de colectores solares, un tanque de almacenamiento y un intercambiador de calor, donde se transfiere el calor almacenado.

Unos de los pioneros en proponer colectores solares de tipo polietileno y policloruro de vinilo (PVC) con intercambiadores de calor para dar calefacción a una piscina exterior fueron Yadav y Tiwari, concluyendo que la temperatura del agua de la piscina en el exterior, aumenta con el incremento del caudal del agua, el área superficial del colector y la longitud del intercambiador (Yadav and Tiwari 1987). Por lo que algunos investigadores se han centrado en el desarrollo de modelos matemáticos que representen el comportamiento termodinámico de los sistemas de calentamiento de agua en piscinas por medio de colectores solares. Singh et al. (1989) Emplearon un modelo matemático para el sistema de calefacción de un vaso de agua y realizaron un estudio paramétrico sobre el efecto del área de los colectores, y el factor de remoción de calor en el desempeño del sistema, estos estudios indicaron que la temperatura del agua en una piscina aumenta a medida que se incrementan estos dos factores en órdenes del 10 al 13 % (Singh et al. 1989). En 1994, Molineaux y colaboradores desarrollaron correlaciones teóricas experimentales del comportamiento térmico del calentamiento de piscinas. Para determinar las correlaciones, evaluaron 5 albercas situadas en Suiza, los resultados muestran que el coeficiente por convección que responde a condiciones con ausencia de viento es de aproximadamente de $3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Mientras que el valor de $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, propuesto por la ASHRAE, no se ajusta para estas condiciones (Molineaux et al. 1994). Haaf et al. (1994) validaron un modelo matemático para calcular la temperatura de piscinas a la intemperie durante el periodo elegido, el algoritmo de resolución del modelo matemático requería menor variables de entrada y una reducción en el tiempo de respuesta del 40 %, en comparación al propuesto por Molineaux y colaboradores.

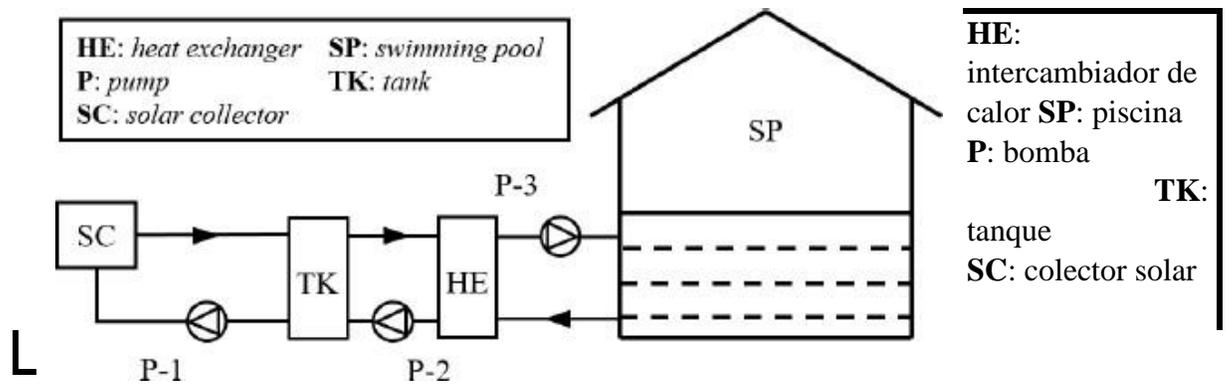


Figura 1.4. Diagrama de un sistema de calentamiento de piscina solar

Fuente. Li et al. (2021)

Posteriormente, a partir de un estudio experimental de un sistema de calentamiento de piscinas con colectores solares realizado en Alemania, investigadores concluyeron que un sistema para piscinas al aire libre con temperaturas inferiores a los 30°C, los colectores de polipropileno con gran superficie producen una mejor relación costo/beneficio. Por lo que son económicamente competitivos en comparación con los sistemas convencionales como calderas, debido a que resultados mostraron que, en la temporada de invierno suministraba 250 a 300 kWh/m², lo suficiente para abastecer la demanda térmica (Croy and Peuser 1994). Investigadores en 1996, midieron experimentalmente el consumo de energía para satisfacer la demanda térmica de una piscina exterior, a diferencia de los investigadores mencionados anteriormente que lo realizaban de manera teórica. También realizaron mediciones de las variables de velocidad de viento, temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar de la ciudad de Marburgo, Alemania donde se ubica la piscina. Una vez que obtuvieron la demanda térmica de manera experimental, lo que se traduce a la energía térmica que tiene que satisfacer el sistema de captación solar. Procedieron a diseñar en TRNSYS el sistema de agua caliente activado con energía solar (Vajen and Hilmer, 1996). Sheinkopf (1997) presentó un trabajo sobre el diseño y estudio operativo para determinar el retorno de inversión de los calentadores solares de polipropileno y por qué estos han tenido una efervescencia en la última década. Años más tarde, en Canadá evaluaron el potencial técnico de los colectores solares de polipropileno para climatizar el agua de una piscina en diferentes condiciones climáticas del país, teniendo en cuenta siete parámetros:

ubicación geográfica, tamaño de la piscina, combustible utilizado, temporada de uso, temperatura deseada, uso de manta térmica y tamaño del sistema de captación solar. Los colectores solares para piscinas se compararon con otras tres tecnologías: gas natural, propano y bombas de calor. Los resultados que obtuvieron, demuestran que el campo de colectores solares de polipropileno son técnica y económicamente capaces de competir en el mercado con los calentadores que utilizan fuentes de energía convencionales, siempre y cuando se utilice una manta térmica para la piscina (Kokko and Daniels, 1999). Van Zyl (2000) investigó un sistema alternativo de captación solar construido con PVC, la configuración del sistema se observa en la figura 1.5. Proponiendo un diseño más robusto y económico en comparación con los convencionales que utilizan tubos de cobre envueltos en material negro, evaluando la influencia de factores como la exposición al sol, así como el efecto del agua con cloro y ácido sobre el material por medio de un prototipo.

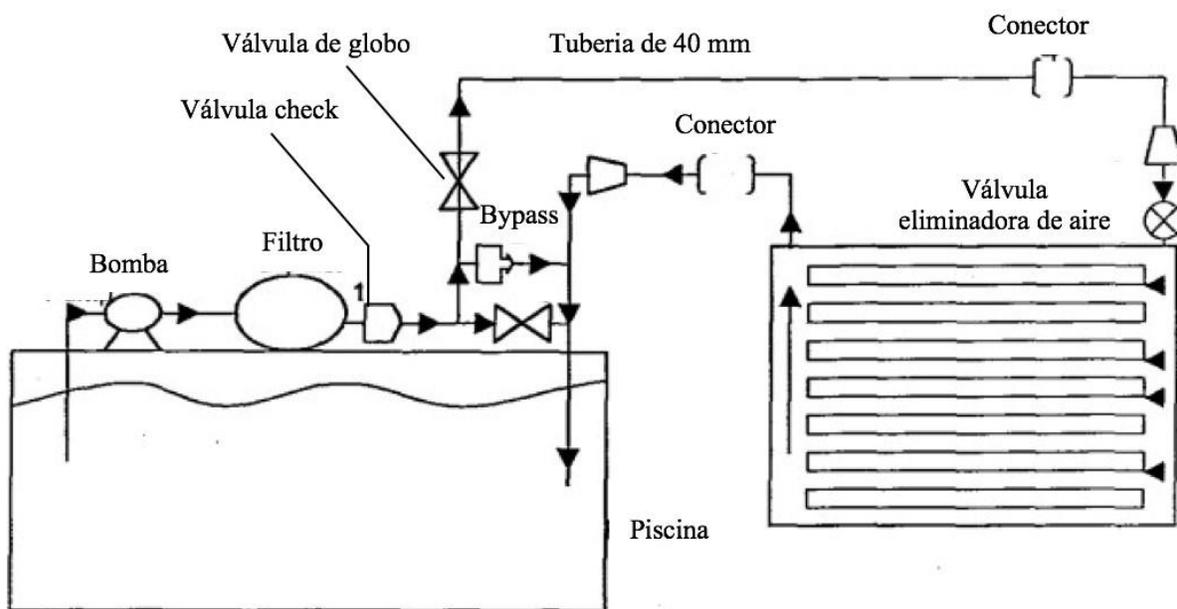


Figura 1.5. Configuración del sistema de climatización solar para piscina propuesto en el estudio de Van Zyl (2000)

Duomarco and Pérez-Magnou (2005) realizaron un estudio teórico sobre el comportamiento térmico de las piscinas en el exterior o interior en diferentes escenarios, por medio del software EXCEL utilizando la herramienta denominada macro. El primer escenario consiste en no contar con los siguientes equipos: colectores solares, calentamiento auxiliar y manta térmica. En el segundo escenario solo cuenta con una cubierta o manta térmica para disminuir las

pérdidas térmicas en la noche. En el tercer escenario se añadió un campo de colectores con un área equivalente al 50 % de la superficie de la piscina. El cuarto escenario se implementó una estrategia de ahorro de energético, que consiste en retirar la manta térmica y recorrer la temporada de baño. Concluyendo que, para asegurar un funcionamiento durante el invierno es necesario un sistema de captación con un área mínima igual a la mitad de la superficie del espejo de agua, la manta térmica y una fuente de calor auxiliar (caldera). La fracción o aportación solar calculada fue de 43% para mantener la temperatura del vaso de agua a 26 °C. Stefanelli et al. (2010) analizaron la eficiencia de un diseño de colectores alternativos para el calentamiento de piscinas, este diseño está fabricado con tubos de polietileno formando intercambiadores de calor en espiral, reduciendo la inversión inicial del sistema debido al costo de los materiales. A partir de las pruebas numéricas pudieron concluir que este nuevo diseño de colectores solares tiene una mejor relación coste-beneficio cuando el área superficial es igual al 80% del área de la piscina, el espesor de la pared de polietileno es de 1.5 mm y el funcionamiento de la bomba intermitente, 4 minutos encendida y 28 apagada. En el 2010 en España, se realizó la validación del modelado matemático para evaluar la transferencia de calor en la piscina con una superficie de 50 m², a través de un registro del comportamiento de la temperatura del agua y los datos meteorológicos del lugar. La simulación con TRNSYS incluyó la piscina y el sistema de captación solar, proporcionando información sobre el aumento de la temperatura para diferentes áreas del campo de captación. La simulación con TRNSYS incluyó la piscina y el sistema de captación solar, los resultados muestran que para un área de captación solar del 50 % de la superficie del espejo de agua de la piscina, se tiene un incremento en la temperatura de 2 °C, mientras que para un área del 100 % de la superficie de la piscina solo se tiene una ganancia de 1.3 °C con respecto al área de captación anteriormente mencionada. Además, se cuantificaron las pérdidas de calor, las pérdidas por evaporación representan un 57% de las pérdidas totales, mientras que las pérdidas por radiación y convección representan el 30% y 13% respectivamente, todas ellas correspondientes a una superficie del campo de colectores igual a la mitad de la superficie del espejo del agua. Produciendo una herramienta, que junto a los costes económicos sirve para la decisión del óptimo dimensionamiento (Ruiz et al. 2010).

También se han presentado estudios para mejorar la eficiencia y rendimiento de los sistemas de calentamiento solar. Una de las propuestas es la utilización de una bomba de circulación

con un caudal bajo, mejorando la eficiencia energética del sistema. Demostrando que los colectores solares de placa plana que funcionan con caudales reducidos en un 75%, generan ahorros del 80% en el consumo de energía eléctrica de estos equipos, mientras que el rendimiento de los colectores solares se ve reducido alrededor de un 10-15% (Cunio and Sproul 2012). Investigadores en el 2015, presentaron un modelo numérico para observar la dinámica de un sistema de calefacción solar con colectores solares estacionarios acoplados a una piscina exterior. Para realizar dicho estudio se tomaron en cuenta tres piscinas, cada una con dimensiones distintas y tres diferentes colectores solares (colectores sin cubierta de vidrio, con cubierta de vidrio y tubos evacuados). Los resultados demostraron que los colectores sin cubierta de vidrio son apropiados para este tipo de aplicación y los colectores de tubos evacuados pueden ser útiles solo en el caso de piscinas grandes como lo son las olímpicas (50 x 25m) reduciendo el área de captación solar hasta en un 50 % (Dongellini et al. 2015). Posteriormente, se desarrolló una simulación sobre el efecto de la reducción del flujo de agua (bomba de circulación de bajo caudal) en el desempeño de un colector solar con una área de captación de 20.5 m² para una piscina en el exterior con un espejo de agua de 36 m², los resultados que obtuvieron proponen que el flujo óptimo era de 0.016 kg/ (s·m²), con el cual se obtiene un ahorro de energía del 60% (Zhao et al. 2018).

Otra manera de mejorar el rendimiento de los sistemas de calentamiento solar son los módulos híbridos fotovoltaicos/térmicos (PV/T, por sus siglas en ingles), que convierten la energía solar en energía eléctrica y térmica. En 2015 se desarrolló un estudio sobre estos sistemas PV/T con el objetivo de evaluar su desempeño en una piscina del exterior. La configuración del sistema de calentamiento PV/T se puede observar en la figura 1.6, donde primeramente la bomba P-1 succiona agua del tanque para hacer fluir el agua por dentro de los módulos PV/T, incrementando la temperatura del agua y retornarla al termotanque, para ser transportada al servicio de agua caliente doméstica o a la piscina. Concluyendo que el desempeño mejora en un 5 al 10 % al incorporar estos sistemas, sin embargo se requiere una inversión inicial más grande debido al costo de este tipo de colectores, por lo que es necesario implementar políticas con incentivos para promover el uso de esta tecnología (Buonomano et al. 2015).

Lugo et al. (2019) presentaron un estudio de simulación en TRNSYS para discutir el desempeño de un sistema de climatización para una piscina al aire libre activado con energía solar por medio de colectores de placa plana en regiones con un clima cálido. El modelo fue validado con los datos experimentales de aproximadamente un año en una piscina en Cuernavaca, Morelos, México. Dicha piscina se encuentra rodeada de vegetación (observar figura 1.8), por lo que se introdujo una función para representar el sombreado que genera la vegetación a lo largo del año. Los resultados muestran que el estudio de simulación predice la temperatura del vaso de agua de la piscina en diferentes condiciones de trabajo, ya que cuenta con un margen de error de $\pm 2\%$, una diferencia de temperaturas entre la experimental contra la simulada de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y un coeficiente de determinación (R^2) = 0.9723, generando una demanda térmica representativa del fenómeno real. En un estudio realizado por Marín et al. (2019), se analizó un módulo que realiza un Control Predictivo de Modelos (CPM) basado en una estrategia de Desconexión Temprana (ESO), demostrando que el uso del control predictivos ESO pueden reducir un 18.7 % la demanda energética de una piscina que utiliza un sistema híbrido solar-caldera, por lo que también se reduce un 42.6 % el consumo de combustible, manteniendo en línea las condiciones térmicas de la piscina según estándares internacionales.

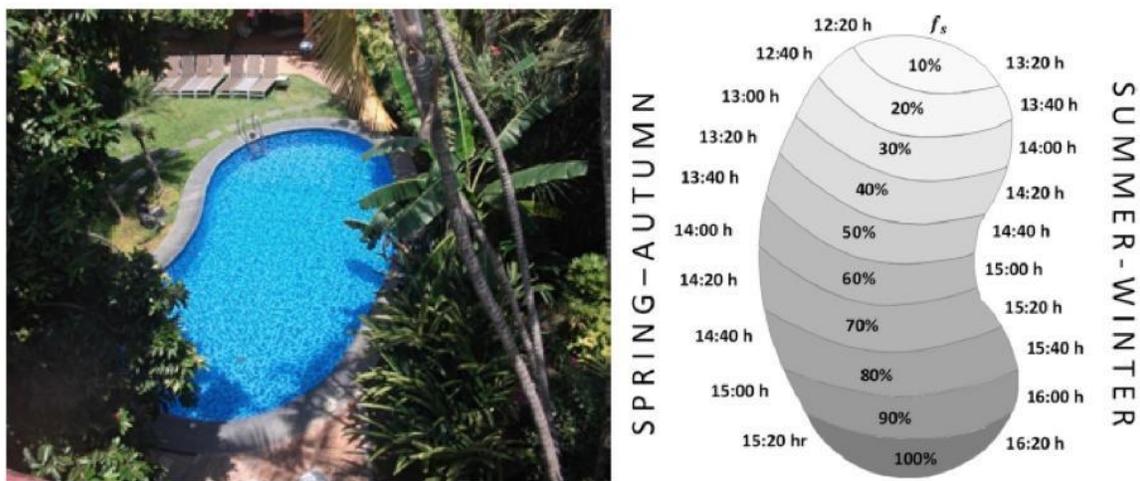


Figura 1.8. Vista aérea de la piscina y su mapa de sombra en porcentajes.

Fuente. Lugo et al. 2019.

Li et al. (2020) presentaron un estudio donde proponen la integración de las bombas de calor, los colectores solares y los depósitos de material de cambio de fase (PCM) para abastecer la demanda térmica de una piscina exterior, con la finalidad de ampliar su disponibilidad en la temporada de invierno, utilizaron TRNSYS y MATLAB para analizar diferentes

configuraciones del sistema de climatización variando el área de los colectores solares, la capacidad de calefacción de la bomba de calor y los volúmenes del tanque de PCM, por lo que se identificó el diseño óptimo para una mejor relación coste-beneficio, el cual consta de un sistema de captación con una fracción solar (γ) de 26.2 %. Logrando llegar a reducir el 67.5 % de las emisiones de CO₂. Un año más tarde, Hassen et al. (2021) desarrollaron un estudio teórico acerca de la influencia de diferentes tipos de colectores solares planos en el factor de fracción solar en un sistema de calentamiento para una piscina olímpica cubierta en Bagdad, Iraq. Los resultados que obtuvieron mostraron que los valores más altos de la fracción solar se registraron con un colector solar de absorción con doble cubierta selectiva.

□ Sistema de calefacción para piscina con biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable que tiene la característica de tener una huella de carbono neutra, jugando un papel importante para una matriz energética sustentable, dando soluciones para reducir y reutilizar los residuos orgánicos para la generación de energía térmica o eléctrica. Esta fuente de energía renovable (biomasa), puede utilizarse en calderas de gas para producir calor por medio de la combustión del biogás o biomasa seca, transfiriendo el calor de combustión a un fluido en un intercambiador. Katsaprakakis (2015) estudio dos sistemas de calentamiento de agua para piscinas: en el primer sistema todo el calor necesario para cubrir la demanda procedía de la caldera que utiliza biomasa seca (pellet) para la combustión, este sistema se visualiza en la figura 1.9. Mientras que en el segundo, el calor necesario proviene de dos fuentes de energía (biomasa-solar), por lo que existe un lazo de control para ver que fuente de energía es la que va calentar el agua de la piscina. Si la temperatura de los colectores era 4 °C mayor que la del vaso de agua, la bomba de circulación de los colectores se encendía; en el caso contrario, se apaga y el calentador de biomasa se encendía debido a que el colector solar no puede suministrar la demanda térmica del vaso de agua. Los autores concluyen que los costes de funcionamiento se reducen en comparación con los convencionales que usan combustibles fósiles. Además, el tiempo de retorno de inversión es menor a cinco años.

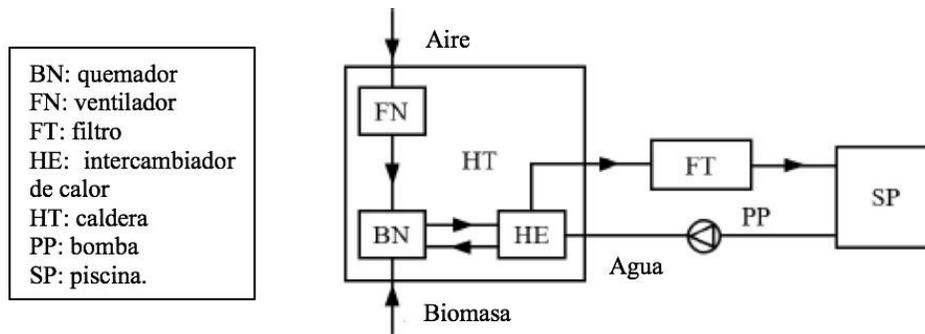


Figura 1.9. Sistema de calefacción para piscina activado con biomasa.
 Adaptado de Katsaprakakis (2015).

Por lo anterior expuesto, en este proyecto se propone primeramente plantear el modelo matemático de transferencia de calor de la piscina olímpica de UABC, con base a lo presentado en la bibliografía. Seguido del diseño y estudio operativo de un sistema híbrido solar-biomasa. Con el fin de evaluar su factibilidad económica y proponer una configuración con un buen desempeño técnico, pero con los mejores valores en los indicadores económicos con tiempo de recuperación, tasa interna de retorno y valor presente neto.

1.3 HIPÓTESIS

El diseño y estudio operativo de un sistema de calefacción solar-biogás para el complejo acuático de la UABC, ayuda a demostrar la pertinencia técnica, económica y ambiental de estos sistemas activados con fuentes de energías renovables.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y estudiar operativamente un sistema de calentamiento solar-biogás para el complejo acuático de la UABC, que asegure una buena operación y demuestre pertinencia económica y ambiental.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Estudiar y definir el estado del arte de las tecnologías de calentamiento de agua para piscinas.
- Comparar y seleccionar entre diferentes sistemas de calefacción activados con energías renovables.
- Definir modelo matemático de transferencia de calor de la piscina.

- Crear una herramienta de simulación a partir de la programación del modelo matemático para evaluar la demanda térmica de la piscina.
- Validar modelo matemático con datos experimentales reportados por la bibliografía.
- Diseñar la propuesta final del sistema híbrido de calentamiento de agua para el complejo acuático.
- Proponer dinámica de operación óptima para el sistema de calentamiento solarbiogás.
- Proponer y evaluar los modos de operación para la mejor configuración del sistema híbrido.

Capítulo 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se abordan los mecanismos de transferencia de calor, que son conceptos primordiales para entender el funcionamiento de las tecnologías propuestas para los sistemas de climatización. Después, se discuten los conceptos de energía solar para tener un panorama general de este recurso energético, empezando con las características y naturaleza de esta fuente energía fuera de la atmósfera terrestre. Dando paso a la descripción de algunas de las tecnologías de colectores solares para aplicaciones de calentamiento de albercas. en la siguiente sección, se plantea la descripción y definición de la biomasa como una fuente de energía renovable estratégica para los sistemas activados con energías renovables, ya que la intermitencia de algunas puede ser complementada con las características y bondades de la biomasa, solucionando no solo la intermitencia de la energía del sol, sino también aprovecha un residuo que es un problema actual de la sociedad debido a la mala gestión, transformando los residuos orgánicos en un recurso energético por medio el proceso de digestión anaerobia. En la sección final del capítulo se explica cómo son física y operativamente las configuraciones de los sistemas de calentamiento para piscinas activados con energías renovables (termosolar, geotérmico y biomasa).

2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor es una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro, a partir de una diferencia de temperaturas que actúa como fuente motriz. En un análisis termodinámico solo interesa la cantidad de calor que entra o sale del sistema, de un estado de equilibrio a otro (Cengel, 2011). La ciencia que describe más a detalle las razones por las que se realizan estos procesos de transferencia de energía es la transferencia de calor. Este calor tiene tres formas en las que se puede transferir de un sistema a otro: conducción, convección y radiación.

2.1.1 Conducción

Este modo de transferencia de calor se da en materiales sólidos de una pared con mayor temperatura hacia los adyacentes con menor temperatura (ver figura 2.1), como resultado de interacciones entre partículas. La conducción se puede dar en sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos se origina debido a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos, se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La tasa o razón con la que se transfiere el calor de este modo, depende de la configuración geométrica, su espesor, el material del que está compuesto y aún más importante, la diferencia de temperaturas (Incropera et al., 1996). Para este modo de transferencia de calor, la ecuación [1] o modelo que sirve para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo, se conoce como *ley de Fourier* y se expresa como:

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [1]$$

donde:

k Conductividad térmica A Área transversal

ΔT Diferencia de temperaturas

Δx Longitud

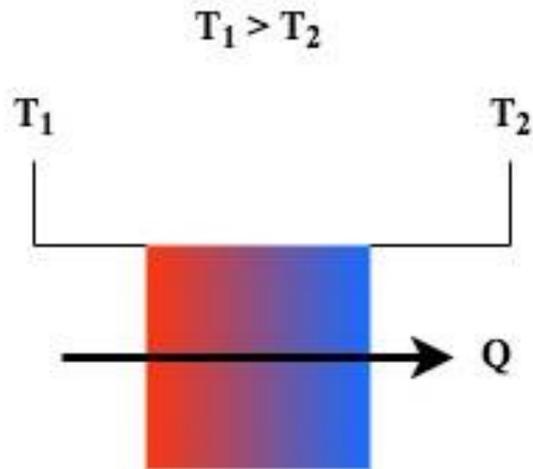


Figura 2.1. Diagrama de transferencia de calor por conducción

2.1.2 Convección

El fenómeno de convección, es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un líquido o gas en movimiento, en el que se compone de efectos combinados como el de conducción y el movimiento de fluidos, tal como se muestra en la figura 2.2. En el caso donde hay ausencia de movimiento de parte del fluido (líquido y gas), la transferencia de calor se realiza por el fenómeno de conducción. La convección se puede clasificar de dos maneras, la primera lleva el nombre de convección forzada, es decir, el fluido es forzado a tener un movimiento (fluir) sobre una superficie mediante medios externos como una bomba hidráulica, un ventilador e incluso el viento. La segunda se le conoce por convección natural o libre, en la cual el movimiento del fluido es causado por las fuerzas naturales de empuje que son inducidas por las diferencias de densidades debido a las variaciones de la temperatura en ese fluido. En los procesos de transferencia de calor donde hay un cambio de fase de un fluido también se considera convección a causa del movimiento de ese fluido inducido, como en la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de gotas de líquido condensado (Incropera et al., 1996). En el caso de la convección, la ecuación o modelo que rige el fenómeno, es conocido como la *ley de enfriamiento de Newton* y se expresa como:

$$Q_{cv} = A \cdot h_{cv}(T_s - T_{\infty}) \quad [2]$$

donde:

A Área de la superficie

h_{cv}	Coefficiente de convección
T_s	Temperatura de la superficie
T_∞	Temperatura del fluido

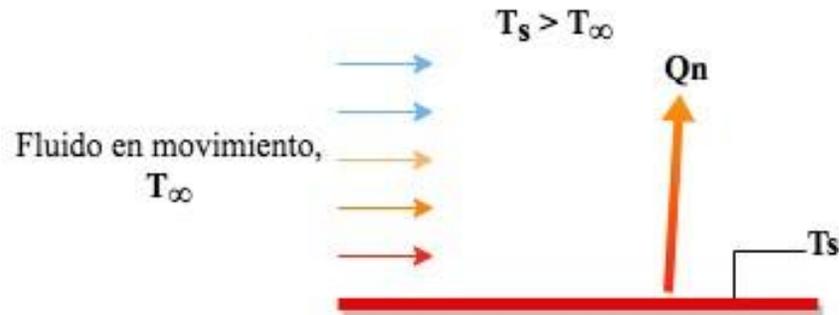


Figura 2.2. Transferencia de calor por convección

2.1.3 Radiación

La radiación es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura específica, como se muestra en la figura 2.3. Dicha materia puede encontrarse en cualquier estado (sólido, líquido y gas). Es un medio de transferencia de calor causado por un delta de temperatura entre dos superficies. Este fenómeno fue estudiado por los físicos del siglo XIX, que mencionan que la radiación es atribuida a cambios en las configuraciones electrónicas en los átomos o moléculas constituidas (Cengel, 2000). La ecuación que permite cuantificar este modo de transferencia de calor, es la *ley de Stefan-Boltzmann* y se expresa como:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s)^4 - (T_{atr})^4] \quad [3]$$

donde:

ε	Emisividad
σ	Constante de Stefan-Boltzman
T_s	Temperatura de la superficie
T_{atr}	Temperatura del alrededor

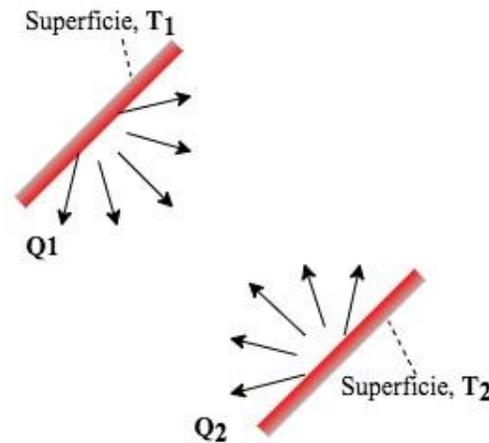


Figura 2.3. Fenómeno de radiación térmica en dos superficies

2.2 BIOMASA

La biomasa también es conocida como bioenergía, ya que es la energía obtenida de la materia orgánica constituida por los seres vivos, excretas y sus restos no vivos (SEMARNAT, 2017). La formación de la biomasa surge a partir de la energía emitida por el sol (radiación solar), mediante el proceso de fotosíntesis. Este proceso es muy complejo, pero a grandes rasgos, las plantas con clorofila transforman el dióxido de carbono y agua de productos minerales sin valor energético, en materia orgánica con un alto contenido energético, que posteriormente sirven de alimento para otros seres vivos de otro nivel en la cadena trófica. De esta manera se almacena la energía solar en forma de biomasa.

2.2.1 Procesos de conversión energética de la biomasa

La conversión de biomasa en energía es un proceso fundamental que aprovecha la materia orgánica de origen biológico para producir energía útil. La conversión de biomasa en energía desempeña un papel muy importante en la mitigación del cambio climático, ya que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar los combustibles fósiles. Existen diversas tecnologías y métodos para llevar a cabo esta transformación de biomasa a energía, y se pueden clasificar en termoquímicos y biológicos (Romanelli et al. 2016).

- Transformaciones termoquímicas

Los procesos termoquímicos son aquellos que involucran la transformación de la materia a energía, basados en la utilización de calor como fuente de transformación de la biomasa. La

conversión termoquímica incluye procesos como la combustión, la gasificación y la pirólisis, donde la biomasa se quema o se somete a altas temperaturas para producir calor, electricidad o biocombustible.

a. Combustión (oxidación química)

Esta transformación química puede definirse como la reacción química por la cual un material, el combustible, a partir de una temperatura determinada, se combina con oxígeno, el comburente, para dar como resultado a dos tipos de productos: los gaseosos, denominados humos o gases de combustión, y sólidos, como las cenizas (Nogués, 2010).

b. Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que ocurre en ausencia de oxígeno. El proceso consiste en tres etapas: dosificación y alimentación de la materia prima, segundo, la transformación de materia orgánica y finalmente, la obtención y separación de los productos como coque, bioaceites y gas (Klug, 2012).

c. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, rico en monóxido, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados como el metano (Nogués, 2010). El gas de gasificación resultante puede aprovecharse en turbinas de gas, ciclos combinados o motores de combustión interna. Si en la transformación química de gasificación se realiza a presión atmosférica, el aire como oxidante, se obtienen los productos con bajo poder calorífico carbonilla que contiene carbono, los inertes originarios del combustible y los líquidos incondensables (Nakasima, 2015).

- Transformaciones biológicas

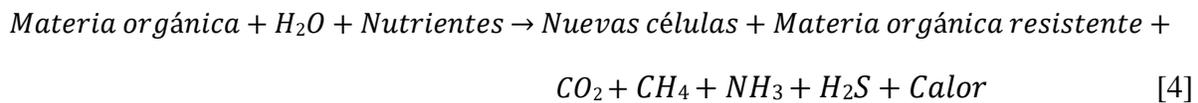
En las transformaciones biológicas de la fracción orgánica de RSU, permiten reducir el volumen y el peso de material, ya sea para producir compost o algún biogás como el biometano. Los organismos implicados en la transformación biológica son principalmente los hongos, bacterias, levaduras y actinomicetos. Estas transformaciones se pueden clasificar según la disponibilidad de oxígeno: aeróbica o anaeróbica, y cada una tiene un producto final.

a. Compostaje aeróbio

El compostaje aerobio es un proceso exotérmico de degradación y estabilización biológica de la fracción orgánica de los residuos en presencia de oxígeno. A través de este proceso se permite tratar y valorizar lo que en un punto era un desecho, evitando los efectos negativos que pudiera ocasionar en el medio ambiente durante todo su ciclo de vida. El producto final tiene una naturaleza húmica, utilizado como fertilizante y enmienda orgánica.

b. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que descompone la materia orgánica con ausencia de oxígeno y produce biogás, un biocombustible proveniente de una fuente de energía renovable. Esta transformación puede expresarse con la siguiente ecuación (4) de balance estequiométrico (Nakasima, 2015):



Una vez que se quema el biogás se libera CO_2 , sin embargo, este CO_2 está encuadrado dentro del ciclo corto del carbono, por lo que el balance global de las emisiones de CO_2 es neutro. La digestión anaeróbica es un proceso de degradación de la materia, la cual puede tratar los residuos orgánicos como el estiércol de ganado, materia vegetal, desechos de comida y residuos de cultivos para producir biogás y reducir las emisiones de GEI (Bandgar y cols, 2021). Durante el proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos se encuentran debajo de la materia orgánica compuesta por dióxido de carbono, agua y metano, este último es el que es aprovechado por su alto poder calorífico como biogás. Este fenómeno se ve modificado por las variables ambientales y las características del sustrato (residuo orgánico + agua). El biogás normalmente contiene de 55 a 70 % de metano, seguido de un 30 a 45 % de dióxido de carbono y trazas de sulfuro de hidrógeno, vapor de agua y nitrógeno, toda esta mezcla de gases tiene en promedio un poder calorífico de 21-24 MJ/m³ (Makamure y cols, 2021).

2.2.2 Biogás

El biogás es un bioenergético de la biomasa que se obtiene por medio del proceso de digestión anaeróbica, donde se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno. La materia

orgánica puede venir de diferentes fuentes, incluyendo los desechos de animales, comida o vegetación. Este biocombustible es una mezcla de gaseosa (ver figura 2.4) constituida principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua (H_2O), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), los cuales pueden comportarse como impurezas (Probiomasa, 2023). La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. El biogás es inflamable cuando contiene CH_4 en un porcentaje mayor al 45%.

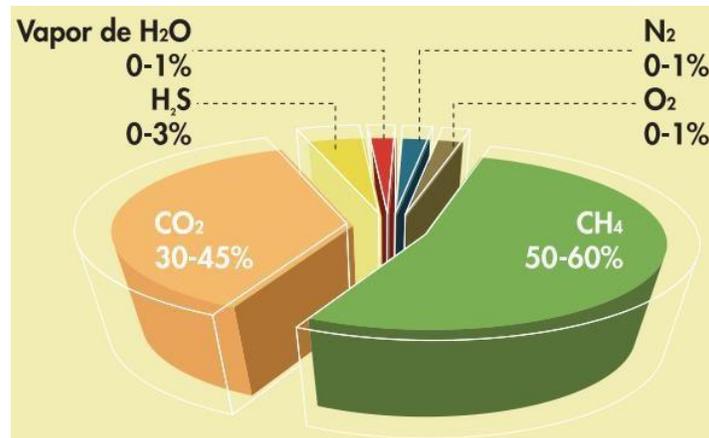


Figura 2.4 Composición del biogás.
Fuente: Probiomasa (2023).

Como este combustible es producido a partir de materia orgánica, entra en la categoría de biocombustible y presenta ventajas con respecto a otros biocombustibles. Una de las principales ventajas es que puede utilizarse donde se requiera calor, ya sea para cocinar, calentar, secar e inclusive también para la generación de energía eléctrica. Además, la producción de biogás tiene beneficios medioambientales al convertir los desechos orgánicos en un biocombustible, reduce la cantidad de residuos orgánicos enviados a los vertederos y mitigando los gases de efecto invernadero. Adicionalmente, al obtener el biogás a partir del desecho orgánico, se obtiene otro producto rico en nutrientes que sirve como fertilizante orgánico, dando paso a una agricultura más sostenible (Romanelli, 2016). En general, el biogás es una fuente de energía secundaria, versátil y sostenible que puede ayudar a reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles, diversificando la matriz energética y mitigando los efectos del cambio climático. Algunas de las características físicas y químicas del biogás dependen de las propiedades del sustrato (entrada de desechos orgánicos) y las condiciones de operación (internas) que se presentan durante todo el proceso (Bajwa et al. 2018).

2.3 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es aquella que proviene del sol por medio de la radiación solar y gracias a esta, la vida en el planeta tierra es posible y puede prosperar. Todos los procesos o ciclos que suceden en el planeta tierra y que dan origen a la vida de todos los seres vivos, son iniciados por la energía emitida por el sol. Dicha energía se puede analizar en forma de onda electromagnética (onda) o fotones (masa), ya que la naturaleza de la luz es dual (Duffie & Beckman, 2013).

2.3.1 Naturaleza solar

El sol es un cuerpo celeste constituido por gases (principalmente, hidrógeno y helio) a una temperatura muy intensa con forma de esfera. Su diámetro es de 1.39×10^9 m, y se encuentra a una distancia promedio de 1.5×10^{11} m de la Tierra. Visto desde la Tierra como punto de referencia, el Sol gira sobre su propio eje aproximadamente 4 semanas, sin embargo, no gira como un cuerpo sólido por lo que en el ecuador tarda unos 27 días, en las regiones de los polos tardan unos 30 días en cada rotación (Thomas, 1956). La temperatura efectiva del sol es de 5777 K como la de un cuerpo negro, sin embargo, no es homogénea ya que tiene regiones cercanas al núcleo, donde se estima una temperatura de 8×10^6 y 40×10^6 K. Este cuerpo celeste por sus condiciones es, en efecto, un reactor de fusión continuo con gases contenidos por las fuerzas gravitacionales. La reacción de fusión que se considera más importante, es un proceso en el que el hidrógeno (es decir 4 protones) se combina para formar un núcleo de helio, el cual cuenta con una menor masa en comparación con los 4 protones del hidrógeno, por lo que esa pérdida de masa se transforma en energía (Duffie & Beckman, 2013). La energía producida en el interior del sol consecuencia de esta reacción, es transferida a la superficie de exterior y después irradiada al espacio. Se estima que cerca del 90 % de la energía es generada en el núcleo (0-0.23R, donde R es el radio del sol) el cual contiene el 40 % de la masa total del sol (Thomas, 1956). Un poco más alejado del centro, a 0.7 R del centro, la temperatura es de 130,000 K con una densidad de 70 Kg/m^3 . En esta región de 0.7-1 R, la convección como medio de transferencia de calor cobra un papel importante por lo se le denomina zona convectiva, donde la temperatura es de 5,000 K y una densidad de 10^{-5} Kg/m^3 (Duffie & Beckman, 2013). La superficie del sol está compuesta por celdas irregulares de convección llamadas gránulos con dimensiones desde 1,000 a 3,000 km, con celdas con ciclos de vida de pocos minutos. Otra de las características de la superficie del sol son las pequeñas áreas negras llamadas poros, que son del mismo orden de magnitud que las celdas convectivas y zonas oscuras más grandes

llamadas manchas solares, que varían de tamaño. La capa exterior de la zona convectiva se llama fotosfera. La cara de la fotosfera se encuentra bien definida aunque su densidad es baja, esta es esencialmente opaca ya que los gases que lo componen están fuertemente ionizados, que son capaces de absorber y emitir un espectro continuo de radiación. Por lo que la fotosfera es la fuente de la mayor parte de la radiación solar. Fuera de la fotosfera se localiza una atmósfera más transparente que se logra observar durante los eclipses solares o mediante instrumentos que obstruyan el disco solar (Robinson, 1966). Por encima de la fotosfera esta una capa de gases más fríos a varios cientos de kilómetros de profundidad llamada capa de inversión. Posterior a la capa que hacíamos referencia anteriormente se ubica la cromosfera, con una profundidad de 10,000 km. Esta capa de gases cuenta con temperaturas algo superiores a la de la fotosfera pero con menor densidad. Por último, se encuentra la zona de la corona con densidades muy bajas pero temperaturas muy altas de 10^6 K (Duffie & Beckman, 2013), en la figura 2.5 se pueden observar todas las zonas en el sol.

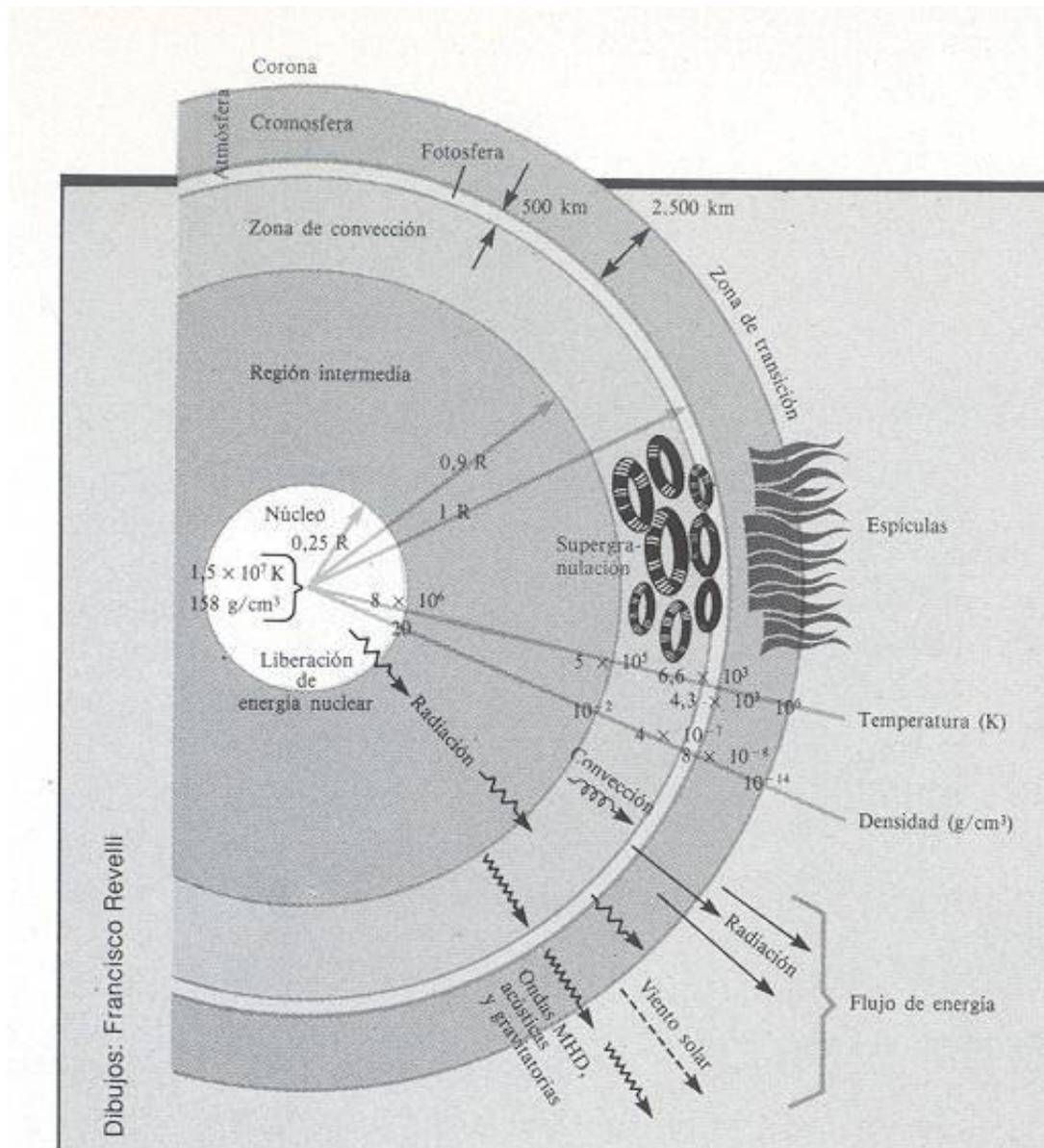


Figura 2.5. Estructura del sol.
Fuente: Duffie, J. A., Beckman, W.A. (2013).

2.3.2 Radiación solar

La energía solar es aquella que proviene del sol por medio de la radiación solar, y gracias a esta, la vida en el planeta Tierra es posible y puede prosperar. La irradiación es el flujo y se mide por unidad de área sobre un intervalo de tiempo ($kWh/m^2/día$). Las radiaciones electromagnéticas que emite esta estrella, están comprendidas por longitudes de onda entre los $0,3 \mu m$ y los $3 \mu m$. La intensidad de la radiación solar medida en el borde exterior de la atmósfera, es conocida como constante solar con un valor promedio de $1,37 kW/m^2$ (Iqbal, 2012). Sin embargo, esta

energía que recibe el planeta Tierra no incide de manera uniforme y es menor a lo especificado por la constante solar, excepto en algunos lugares como el desierto de Atacama. Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones en las áreas de ingeniería, agricultura, arquitectura, ganadería, salud humana y meteorología, dentro de las cuales se destacan: su empleo como fuente renovable de energía en la generación de electricidad y en el diseño sistemas de calentamiento de agua, el diseño de edificios e infraestructura, implicaciones en la salud de la piel, su relevancia en los modelos de calidad de aire, predicción del tiempo y el clima, entre otras aplicaciones.

La energía que emite el Sol en forma de radiación de onda corta, pasa por un proceso de filtración en la atmósfera por la presencia de nubes, y su absorción por parte de las moléculas de gases o de partículas en suspensión (Duffie & Beckman, 2013). Después de cruzar la atmósfera, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental, reflejándose o absorbiéndose según las propiedades de la superficie. Finalmente, la superficie la devuelve con dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga. La radiación solar se puede clasificar por la forma en la que incide en la Tierra, y también por su rango en el espectro electromagnético. Según Kondratyev (1969) las formas en la que incide la radiación en la Tierra se pueden clasificar en las siguientes:

- Directa. Este tipo de radiación es la que traspasa la atmósfera y alcanza la superficie terrestre sin haber sufrido dispersión alguna en su trayectoria.
- Difusa. Es la radiación que alcanza la superficie de la Tierra tras haber pasado por múltiples desviaciones en su trayectoria.
- Reflejada. Es aquella fracción de radiación solar que es cambiada de dirección por estar en contacto con la superficie terrestre, en un fenómeno conocido como efecto albedo.
- Global. Es toda la radiación que llega a la tierra y que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados. La radiación global se puede entender como la suma de la radiación directa y difusa.

La clasificación por su rango en el espectro electromagnético según Smith (2007), es la siguiente:

- Rayos infrarrojos (IR). Son aquellos que se encuentran en rango de longitud de onda de 0.7 a 1000 μm , por lo que emiten calor y cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor a 0 K irradia este tipo de rayos.
- Rayos visibles (VI). Estos rayos son perceptibles para el ojo humano en forma de colores (rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul y violeta), es decir, emiten luz visible.
- Rayos ultravioletas (UV). Son invisibles para el ojo humano, aunque son los que más perjudican gravemente la piel, sus longitudes de onda se encuentran entre los 4 y 400 nm.

2.3.3 Disponibilidad del recurso solar en México

Para evaluar el potencial de energía solar con la que un territorio cuenta, es a través de la radiación solar disponible. Según la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2015), México se encuentra entre las coordenadas 15° y 35° de latitud, región considerada de las más favorecidas en toda América, donde se recibe diariamente, en promedio, 5.5 kWh/m². La zona del noroeste es la que cuenta con mayor potencial, donde la radiación excede los 8 kWh/m² en primavera y verano, como se visualiza en la figura 2.6. Este potencial puede ser aprovechado por medio de las tecnologías fotovoltaicas o termosolares (colectores). El recurso solar suele ser variante durante todo el año. En los meses de verano es cuando mayor recurso solar se tiene en el territorio nacional y para que un colector logre captar la mayor cantidad de energía, es necesario una correcta orientación e inclinación en el lugar de emplazamiento, la cual puede variar de acuerdo a su aplicación o necesidades del usuario, es decir, requieren de una mayor generación en invierno o verano.

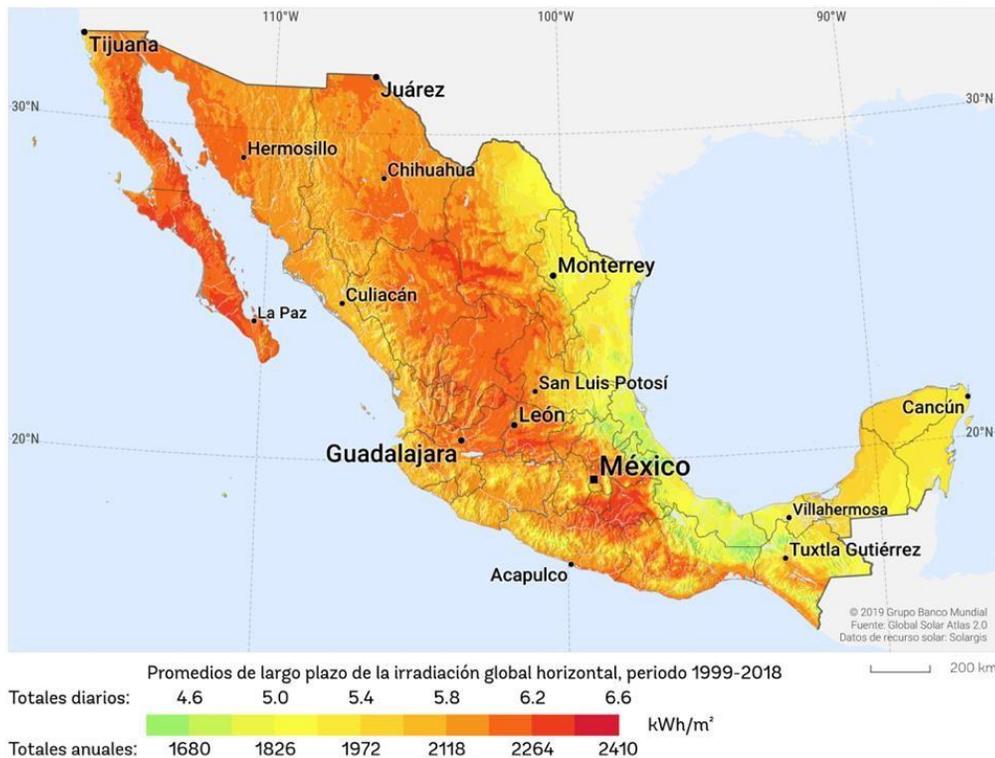


Figura 2.6. Mapa de recurso solar en México

Fuente: Suri, M. 2019.

2.3.4 Energía solar térmica

La energía solar térmica es un tipo de energía que se genera a partir de la radiación solar proveniente de la fusión nuclear en el Sol. Es una fuente de energía renovable, lo que significa que son inagotables en la escala de tiempo del ser humano. Por eso se considera una energía renovable. Las principales aplicaciones de los sistemas solares térmicos (Kannan, 2016) son:

- Producción de agua caliente sanitaria (ACS)
- Calefacción y climatización de espacios
- Precalentamiento para procesos industriales
- Secado
- Pasteurización
- Calentamiento de agua piscinas

La energía solar térmica es una alternativa limpia y sostenible a los combustibles fósiles, que emiten gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático. Se puede clasificar por

tecnología, las estacionarias y las de seguimiento. En este proyecto se consideran solo las estacionarias, debido a que el nivel de temperatura (20-60°C) requerido para el calentamiento de piscinas, no es muy elevado y estas tecnologías trabajan de manera eficiente en esos rangos de temperatura. Adicionalmente, que suelen ser más económicos y su mantenimiento es casi nulo, en comparación con los que tienen sistema de seguimiento. En la siguiente sección se describen más a detalle cómo están constituidas físicamente y como operan estas tecnologías.

2.3.5 Colectores solares utilizados en calentamiento de piscinas

Un colector solar es un intercambiador de calor que transforma la energía de la radiación solar en calor. Un colector solar difiere en varios aspectos de un intercambiador de calor por convección. Estos últimos suelen realizar un intercambio de fluido a fluido. En el colector solar, la energía es transferida desde una fuente de energía radiante hacia un fluido. El flujo de radiación incidente, en el mejor de los casos, es de aproximadamente 1,100 W/m² y es variante (Duffie & Beckman, 2013). Los materiales típicos con los que se fabrica un colector solar, necesitan absorber y retener bien el calor. Mientras que el diseño tiene como objetivo capturar la mayor cantidad de rayos de luz solar y convertirlos en forma de calor. Existen diferentes tipos de colectores solares, que se pueden clasificar por nivel de temperatura, estacionarios o con seguimiento, con concentración o sin concentración.

2.3.5.1 Polipropileno

Normalmente para aplicaciones de calentamiento de piscinas, la temperatura requerida es de 26 a 40°C, de manera que los colectores más utilizados son los planos sin cubierta de materiales polímeros (polipropileno), debido a que tienen una eficiencia considerable para temperaturas menores de 40 °C, son ligeros, fáciles de instalar y son más económicos. Sin embargo, hay que tener en cuenta también las temperaturas ambientales del lugar donde se propone instalar el campo de colectores solares, ya que esta tecnología no cuenta con cubierta para reducir las pérdidas de calor por convección que se dan con el ambiente, el cual actúa como sumidero de calor, este fenómeno se ve influenciado principalmente por la temperatura y velocidad de viento que hay en el lugar. Como se muestra en la figura 2.7, la temperatura ambiente media se refleja en la eficiencia con la que opera el colector ya que no cuenta con barreras o resistencias térmicas que retrasen y minimicen las pérdidas de calor con el entorno (García & Pilawtosky, 2017). Por

ende, no es recomendado este tipo de colectores para instalaciones en lugares con fríos extremos y altas velocidades de viento.

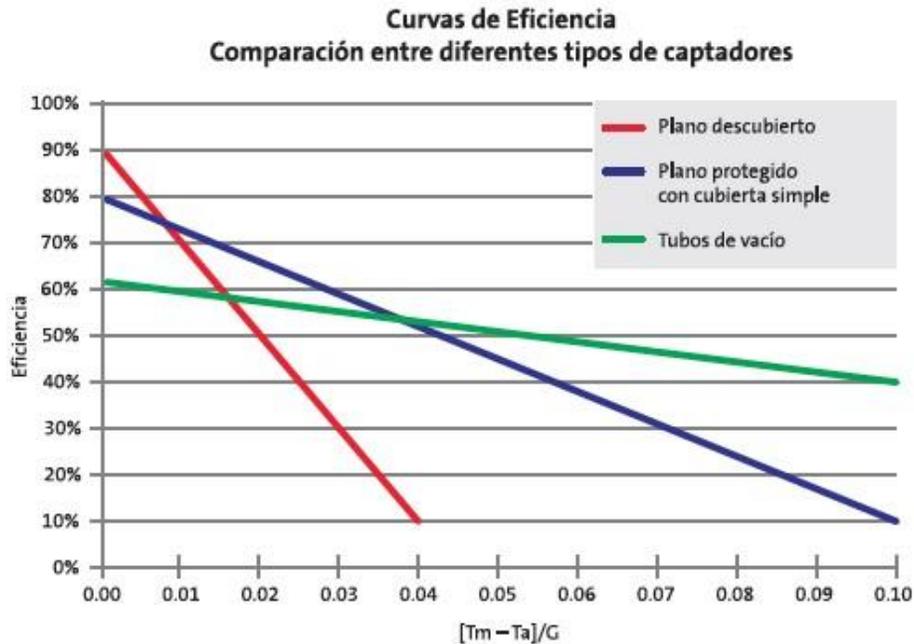


Figura 2.7. Curva de eficiencia para algunos tipo de captadores estacionarios.

Fuente: García Valladares, O., Pilatowsky, I., 2017.

El colector de polipropileno, físicamente está constituido por una superficie de captación del material polímero de color negro, conformada por un conjunto de tubos individuales unidos a un cabezal en la parte superior y otro en la inferior, en donde entra y desembocan el fluido de trabajo (observar la figura 2.8). Dichos cabezales están unidos de forma perpendicular con los tubos individuales que conforman la superficie de captación. El funcionamiento operativo de estos colectores en un sistema térmico para piscinas es el siguiente: mediante una bomba se hace circular el fluido caloportador por los cabezales de entrada, para que ascienda y retiren el calor absorbido por la superficie de captación donde se encuentran unos tubos individuales perpendiculares a la posición de los cabezales.



Figura 2.8. Colector polipropileno de baja densidad.

2.3.5.2 Placa plana

El colector de placa plana está diseñado para aplicaciones que no demandan mucho nivel de temperatura, pueden alcanzar hasta los 80 °C a través de la radiación solar difusa, no requiere de un sistema de seguimiento y requiere poco mantenimiento. Las principales aplicaciones de esta tecnología son para calentamiento de agua y calefacción de espacios. Incluso los edificios con sistemas de calefacción pasiva, pueden considerarse como casos especiales de colectores planos con la pared de la habitación o del acumulador como absorbente (Duffie & Beckman, 2013). Las partes más importantes de un colector básico de placa plana se pueden observar en la figura 2.9. El absorbedor, consta de una superficie negra con una alta absorbancia de radiación, para poder transferir la energía de la radiación solar al fluido. Para retardar o disminuir las pérdidas de calor por convección y radiación, se utiliza una cubierta transparente. Para reducir las pérdidas por conducción, se emplea una envolvente de aislante térmico que cubre todas las paredes del colector excepto el lado superior (cubierta). Los colectores de placa plana regularmente son estacionarios con una orientación particular, según la localidad donde se instalara el colector para lograr una mayor generación de energía térmica durante todo el año.

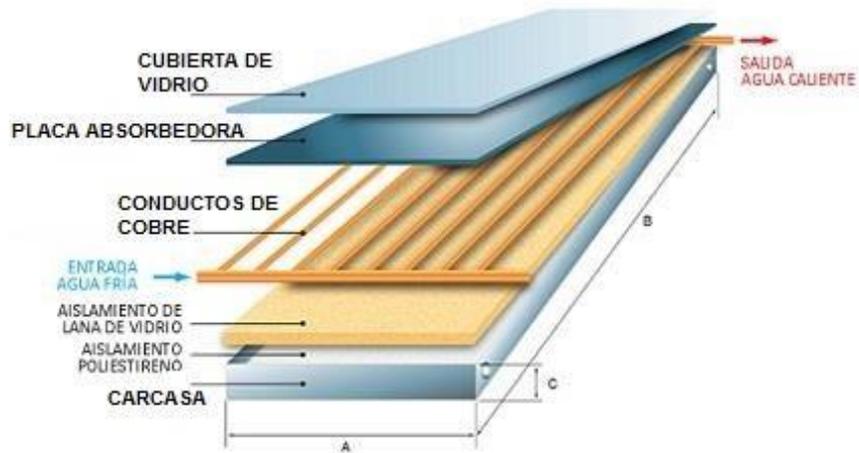


Figura 2.9. Descripción física del colector placa plana.

2.3.5.3 Tubos evacuados

Los colectores de tubos evacuados se encuentran en la clasificación de estacionarios, sin embargo alcanza temperaturas que van de los 50 °C a 95 °C, consecuencia del alto vacío que se ubica dentro de los tubos, permitiendo reducir las pérdidas de calor (García & Pilatowsky, 2017). La superficie captadora está aislada del exterior por un doble tubo de vidrio que crea la cámara al vacío. Sin embargo, estos mismos se pueden subdividir en dos categorías:

- Flujo directo: esta tecnología funciona bajo el principio de termosifón, que calienta el fluido que entra por el tubo, este desciende al mismo tiempo que va retirando calor eleva su temperatura, lo contrario a la densidad que disminuye y sube hasta la parte superior del tubo que conecta con el termo tanque.
- Flujo indirecto. En el caso de los de flujo indirecto son conocidos como colectores de tubos evacuados con heat pipe. En este tipo de colectores el fenómeno es distinto, debido a que el fluido de interés no pasa por dentro de los tubos sino por un cabezal, ya que por dentro del tubo receptor se encuentra el heat pipe con un gas inerte y presiones de vacío favoreciendo el cambio de fase al recibir calor. Al cambiar de fase a vapor sube hasta la parte superior del heat pipe, donde entra en contacto con el fluido caloportador, este le retira el calor de las paredes exteriores del heat pipe ocasionado por el cambio de fase (calor latente) y condensa el fluido al interior del tubo, este desciende para

volver a ser calentado y repetir el proceso mientras haya radiación solar y el gas cambia de fase, tal como se muestra en la imagen de la derecha de la figura 2.10.

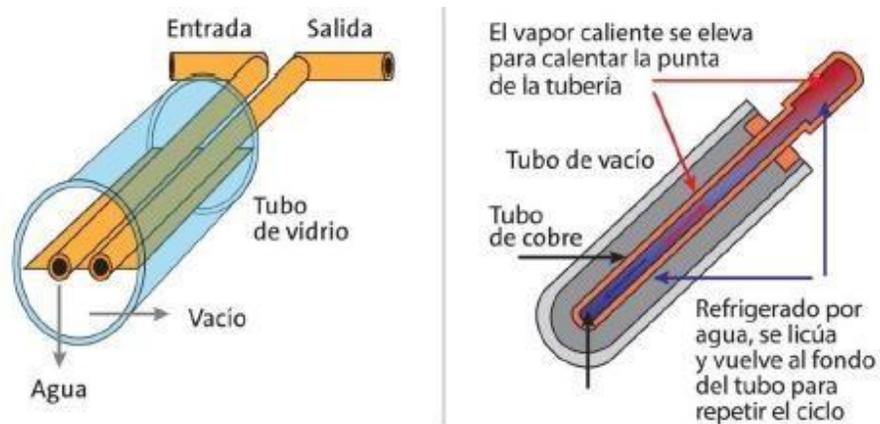


Figura 2.10. Tipos de colectores de tubos evacuados.
Fuente: García Valladares, O., Pilatowsky, I., 2017.

Capítulo 3

3 ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN ACTUAL DE LA PISCINA

3.1 ESTUDIO TÉRMICO DE LA PISCINA

3.1.1 Descripción física y operativa

El centro o complejo acuático de la UABC está formado por la piscina olímpica y una fosa de clavados, las cuales se encuentran al aire libre y completamente sombreado. Dicha instalación deportiva tiene su ubicación en la ciudad de Mexicali, Baja California en las coordenadas lat: 32°37'52" N, long =115°26'4" W, alt = 4.9 m y cuenta con las siguientes características físicas y operacionales:

Descripción física. - la superficie de la alberca es de 1,250 m² (50m x 25m) y una profundidad promedio de 1.8m, la instalación cuenta con un techo de láminas y polines, además del lado oeste cuenta con una construcción que consta de las regaderas y unas gradas para el público. Las superficies enterradas no se encuentran en contacto directo con el subsuelo si no que se encuentra un sótano donde están los principales equipos para la operación de la piscina (bombas, filtros, etc.). Como se mencionó anteriormente el complejo acuático está constituido por dos vasos de agua distintos. El principal es la piscina olímpica donde se brindan la gran parte de los servicios, mientras que el otro cuerpo de agua es una fosa de clavados de tipo exterior, parcialmente sombreada, geoméricamente tiene las siguientes dimensiones: área superficial (25 x 20m) y una profundidad promedio de 5 m.

Descripción operativa: En México, la norma mexicana NOM-245-SSA1-2010 específica los requisitos sanitarios y la calidad del agua que deben cumplir las albercas públicas en el país (Secretaría de Salud, 2012). Este es el instrumento nacional donde se establecen las especificaciones para los procedimientos a seguir en el muestreo de pruebas, así como las condiciones sanitarias de operación que reduzcan o erradiquen las enfermedades y los accidentes de los usuarios. Si bien la norma no entra en detalles técnicos respecto a la circulación, existe la EC0207 que es un estándar de competencia especialmente para operadores de piscinas nacionales (CONOCER, 2012). En su código 0750 titulado “Mantener la circulación y filtración del cuerpo de agua”, indica un tiempo de rotación de agua de 6 horas para piscinas. Siguiendo este estándar, se constata que el dimensionamiento original del sistema presenta una limitante para lograr eficientemente un tiempo de rotación de agua de 6 horas. De acuerdo a una revisión en sitio, el diseño inicial de la alberca olímpica cuenta con un tubo de 8 pulgadas de PVC cédula 40 para la succión del fondo. Por lo que para lograr la rotación de agua en 6 horas o menos, marca un flujo de 1,527 gpm, sin embargo, con este gasto se alcanzan velocidades no recomendadas en la sección 311.3 del código ISPSC (ISPSC, 2015), principalmente por las siguientes razones:

- Una velocidad mayor del rango de 6-8 pies por segundo incrementa el riesgo de atrapamiento, sobre todo en infantes, en las zonas de succión de agua.

- La selección de una bomba que mueva un caudal mayor a lo recomendado creará un proceso de cavitación en la voluta de la bomba; al requerir la bomba más agua para mover con la limitante del tubo de succión, la energía potencial de la presión del fondo encuentra restricciones en su camino perdiendo carga en el proceso, incrementando su velocidad y su energía cinética dando como resultado que la presión disminuya por debajo de la presión de vapor, al punto de evaporar el agua. Este proceso crea burbujas de vapor que implosionan en el interior de la bomba, afectando la carcasa y/o el impelente.

Por lo antes mencionado, la bomba hidráulica para la circulación del agua de la piscina olímpica mantiene un caudal de entre 1,500 y 1,350 gpm que resultan en tiempos de 6 horas 10-45 minutos. El sistema hidráulico con el que cuenta el complejo acuático cumple con los requisitos de recirculación y filtración de los vasos de agua, y está constituido por los equipos mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Equipos del sistema hidráulico

Nombre	Cantidad	Detalles técnicos
		Marlow e-530S L
Motobomba	2	Capacidad de 1400 GPM a 105 pies de C.D.T. Motor de 50 HP Trifásico a 480 V Pentair THS4284
Filtro horizontal de arena	5	Área efectiva de filtración de 23.2-19.7 ft ²
Válvula de PVC tipo mariposa	10	Asahi PoolPro de 6" Cuerpo de PVC con sellos de EPDM

3.1.2 Metodología para la simulación térmica de la piscina

En una primera estancia se seleccionó el software de Trnsys con la vinculación de Matlab, con base a un estudio comparativo que se realizó en la primera fase del proyecto. Dicho estudio comparativo, se ejecutó en función de las características que cobran relevancia en este estudio

de simulación (confiabilidad, funcionamiento y robustez). Una de las cosas que se buscaba que cumpliera el software, es que te permita evaluar operativamente la tecnología tomando en cuenta las condiciones meteorológicas. Cabe mencionar, que este software no contaba con un módulo o type para representar el fenómeno de transferencia de calor que sucede en una piscina, por esa razón se tuvo que plantear, desarrollar y resolver el modelo matemático de transferencia de calor en una piscina en el exterior, como se muestra en el diagrama de la figura 3.1 y posteriormente traspararlo a un código fuente en la plataforma de Matlab.

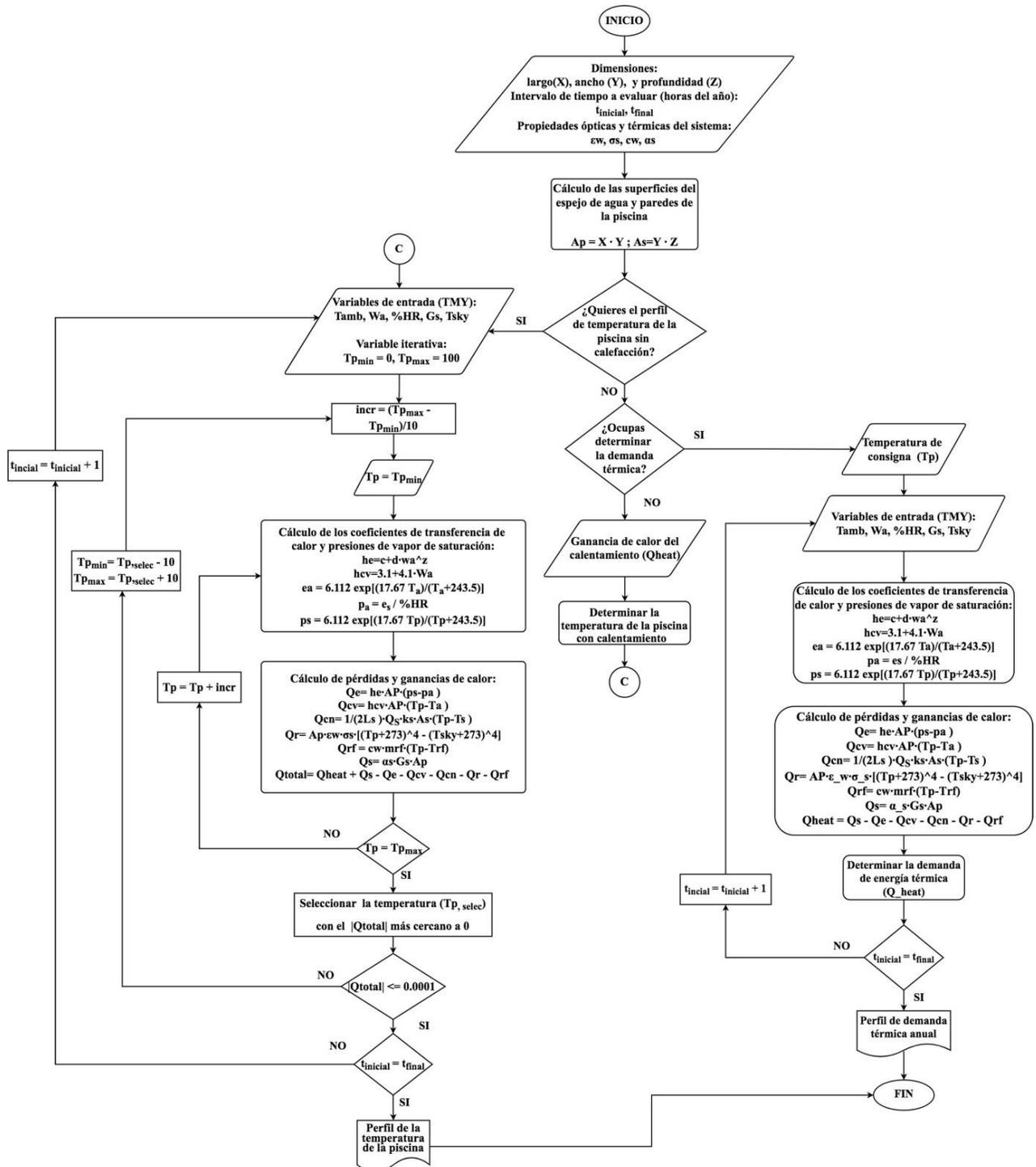


Figura 3.1. Diagrama de flujo para el modelo matemático propuesto.

El modelo determina analíticamente la transferencia de calor para una piscina, con el fin de calcular el perfil del comportamiento térmico de una piscina en estado transitorio a partir de datos meteorológicos horarios. El modelo se sustenta en información del lugar y las características de funcionamiento de la piscina. En función de las entradas meteorológicas y en

las condiciones del sistema que forman el entorno con el que interactúa la piscina (figura 3.2), en cada paso de tiempo (t), los cálculos se apoyan de correlaciones empíricas desarrolladas por investigadores (Duffie y Beckman., 2013; McMillan, 1971) y teóricas de transferencia de calor, para estimar el valor de las pérdidas de calor causados por los mecanismos como conducción, convección, radiación y evaporación (tabla 3.2). Las pérdidas y ganancias se integran a lo largo de la hora, y se calculan los términos almacenamiento de energía para determinar la temperatura promedio de la piscina, la cual será el inicio de la siguiente hora ($t + 1$). Los datos meteorológicos de entrada se utilizan para resolver las condiciones del sistema en la hora posterior ($t + 2$).

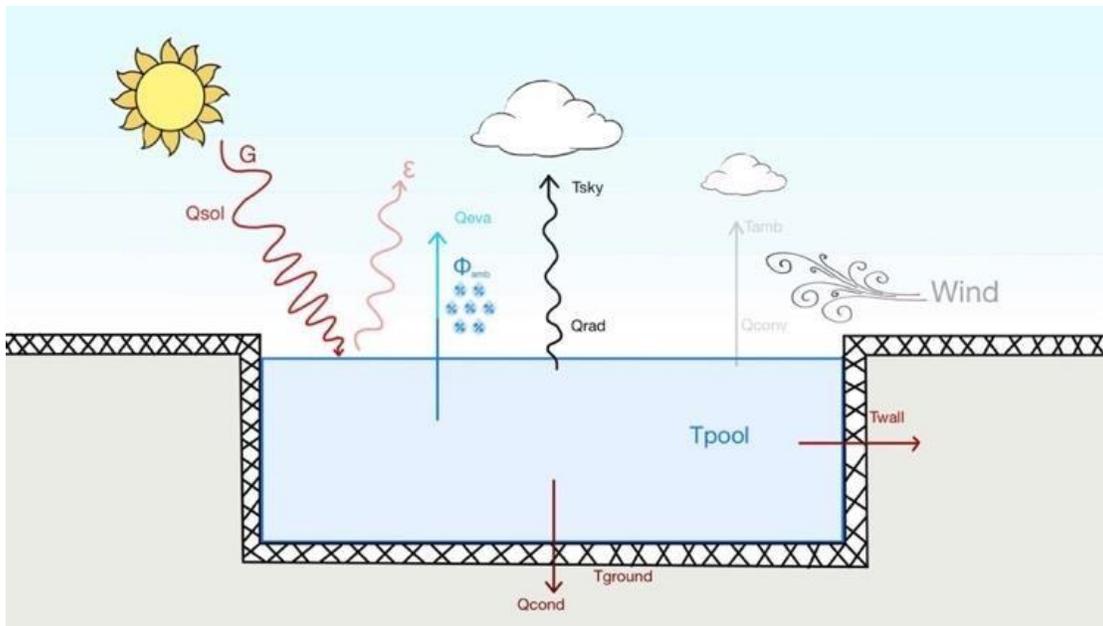


Figura 3.2. Esquema con las principales variables del sistema.

Tabla 3.2. Ecuaciones del modelo de transferencia de calor de la piscina

Balace de energía	$V_p \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \frac{dT_p}{dt} = Q_s - Q_{eva} - Q_{cv} - Q_{cn} - Q_{rad} - Q_{rf}$ [1]
Pérdidas por evaporación	$Q_{eva} = A_p \cdot h_{eva} \cdot (P_{v,sat} - P_{v,amb})$ [2]
Pérdidas por convección	$Q_{cv} = h_c \cdot A_p \cdot (T_p - T_{amb})$ [3]
Pérdidas por conducción	$Q_{cn} = \frac{1}{2L_s} \cdot Q_s \cdot k_s \cdot A_s \cdot (T_p - T_s)$ [4]
Pérdidas por radiación	$Q_{rad} = A_p \cdot \epsilon_w \cdot \sigma_s \cdot ((T_p + 273)^4 - (T_{cielo} + 273)^4)$ [5]
Pérdidas por renovación de agua	$Q_{rf} = c_w \cdot m_{rf} \cdot (T_p - T_{rf})$ [6]
Ganancias por radiación solar	$Q_s = \alpha_s \cdot G_s \cdot A_p$ [7]

3.1.3 Validación del modelo de transferencia de calor para una piscina

Para validar los resultados obtenidos por el modelo, se utilizaron datos de un experimento (Ruiz y Martínez, 2010) en una piscina en la ciudad de Alicante, España, donde los veranos son cálidos, y mayormente despejados. El comportamiento térmico de la piscina se monitorizo con el sistema de la figura 3.3, además realizaba mediciones de las variables ambientales, como: radiación, velocidad de viento, humedad y temperatura ambiente. Las observaciones se compararon con los resultados del modelo matemático propuesto, utilizando datos los meteorológicos recopilados en el experimento bajo el mismo intervalo de tiempo.



Figura 3.3. Instrumento de medición de las variables meteorológicas.
Fuente: Ruiz y Martínez, 2010.

3.1.3.1 Condiciones del sistema experimental

Para el análisis térmico se utilizó como caso de referencia una piscina privada al aire libre en un barrio de la ciudad de Alicante, en el sureste de España situada en las coordenadas 38.3452 °N, longitud: -0.48149 °O, ya que los inviernos son semejantes a los de la ciudad de Mexicali, México y reportan los datos necesarios para validar los resultados obtenidos en la simulación con el modelo matemático. La superficie del espejo de agua de la alberca es de 50 m² y un volumen de 82.5 m³. La piscina cuenta con un circuito simple de filtrado y no dispone de un sistema de calefacción.

En la tabla 3.3 se muestran los datos de entrada que provienen del sistema experimental. Estos datos son necesarios para adaptarse a las condiciones del caso experimental, y verificar si el

modelo matemático puede representar confiablemente la variable de respuesta (temperatura del vaso de agua).

Tabla 3.3. Valores iniciales de los datos de entrada y parámetros.

Variable	Entrada/Parámetro	Unidades	Valor inicial
Temperatura ambiente	Entrada	°C	26
Radiación solar o irradiación	Entrada	W/m ²	810
Humedad relativa	Entrada	%	43
Temperatura efectiva del cielo	Entrada	°C	23
Velocidad del viento	Entrada	m/s	1.4
Flujo másico del agua renovada	Entrada	l/s	2.86
Longitud de la piscina	Parámetro	m	10
Ancho de la piscina	Parámetro	m	5
Profundidad de la piscina	Parámetro	m	1.65

Para la validación se tomaron los datos del estudio reportado por Ruiz y Martínez (2010), específicamente los datos meteorológicos (figura 3.5 y 3.6), y los valores de la temperatura de la piscina en intervalos de tiempo de 10 minutos durante 3 días, con el fin de predecir el comportamiento de la temperatura de la piscina con el modelo desarrollado en MATLABTRNSYS y validarlo con los datos experimentales de la piscina. Los sensores que se utilizaron en el estudio de Ruiz y Martínez (2010) para registrar las condiciones ambientales en el estudio experimental se ubicaron en la orilla de la piscina, donde tienen una gran exposición al viento y radiación solar, excepto el sensor de temperatura de la piscina el cual se colocó en el centro de la piscina a una profundidad de 1 m. En la figura 3.4 se puede observar que el valor máximo de la variable de velocidad de viento fue de 1.4 m/s, a las 12 p.m. del primer día, lo que favorece al fenómeno convectivo. En la figura 3.5 se graficaron temperatura ambiente, humedad y radiación las primeras dos variables se leen con el eje vertical del lado izquierdo, y se puede apreciar que la temperatura ambiente máxima ronda en los 30 °C y la mínima de 12 °C. En el caso de la humedad los valores máximos se encuentran en las madrugadas superando el 90%, mientras que en las tardes decae. Mientras que la de radiación, logra alcanzar los 810 W/m².

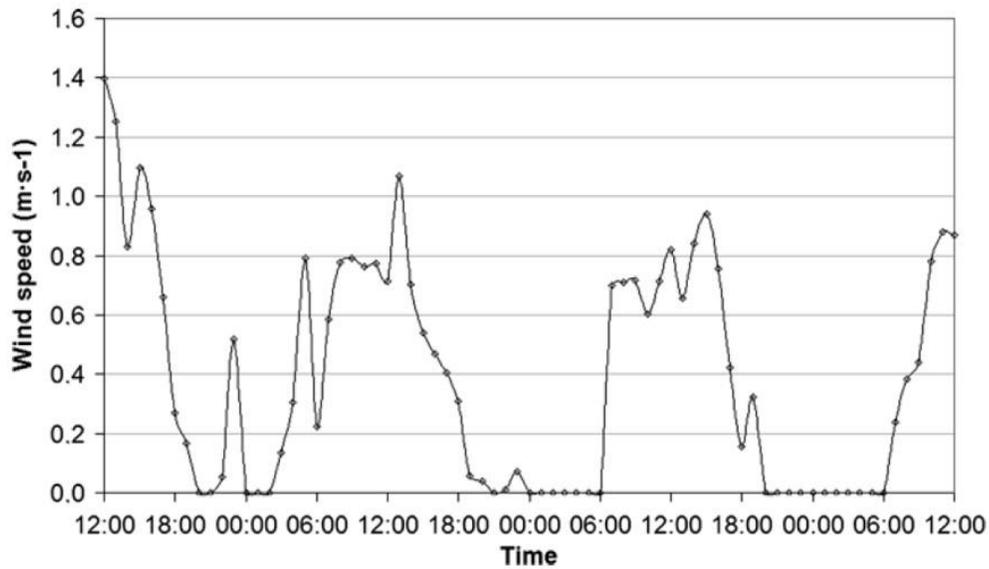


Figura 3.4. Registro de la velocidad de viento Alicante, España.
Fuente: Ruiz y Martínez, 2010.

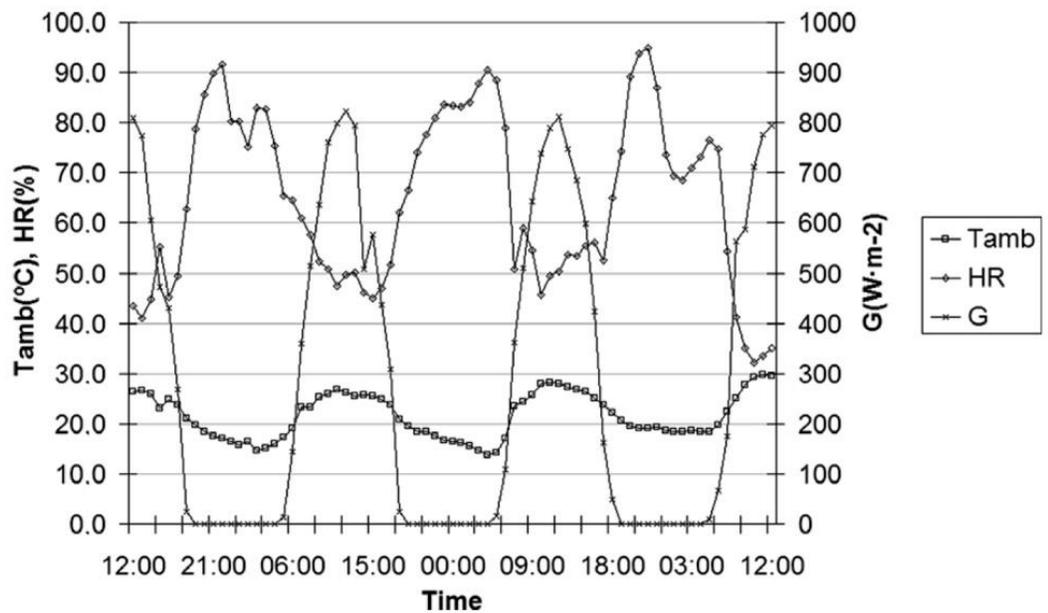


Figura 3.5. Comportamiento de las variables ambientales (T_{amb} , HR, G).
Fuente: Ruiz y Martínez, 2010.

3.1.3.2 Resultados de validación

El modelo matemático descrito en las secciones anteriores, utilizó las dimensiones de la piscina y variables meteorológicas del lugar. Para posteriormente, calcular el intercambio de calor entre la piscina y el entorno (ambiente), prediciendo la temperatura media horaria de la piscina. Los

valores adquiridos de la simulación se observan en la figura 3.6 y se compararon con los datos experimentales de la piscina registrados por el sistema de adquisición de datos. Con el propósito de ver la representatividad del modelo matemático, bajo el punto de vista de algunos indicadores estadísticos.

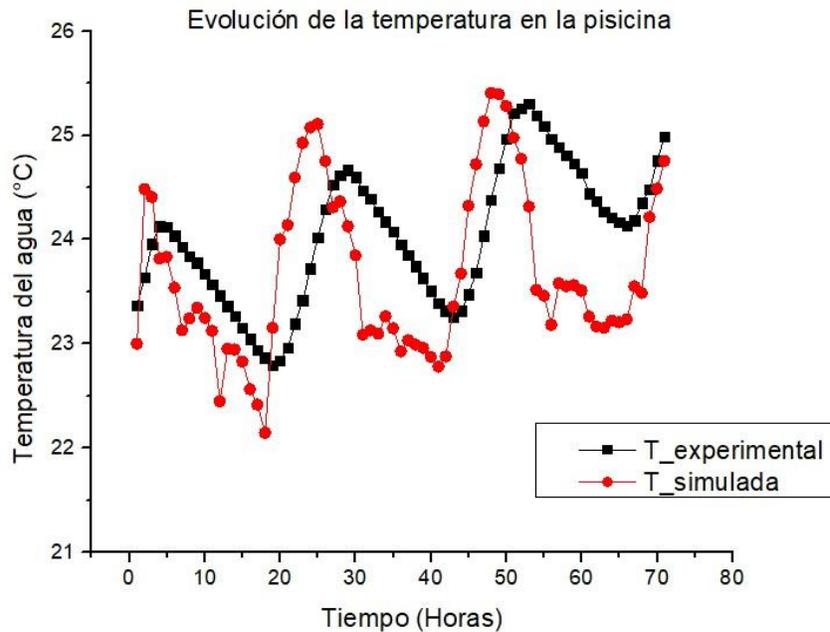


Figura 3.6. Comportamiento de la temperatura de la piscina.

Los resultados muestran que si se introducen las condiciones meteorológicas adecuadas, se puede hacer una predicción precisa y confiable del estado térmico de la piscina. El error relativo promedio de la temperatura predicha por el modelo dentro de la piscina, en comparación con los valores medidos es de 0.0326 (3.2 %), RMSE = 0.08, MAE = 0.78 y un BIAS= -1.48 %. Estos indicadores estadísticos se reportan en la tabla 3.4 y la mayor discrepancia se obtuvo en el segundo día con una diferencia en las temperaturas de 1.79 °C (Figura 3.7).

Tabla 3.4. Indicadores estadísticos de la validación.

RMSE	MAE	BIAS%	$\bar{\epsilon r}$
0.7867	-1.4825	0.0326	0.8863

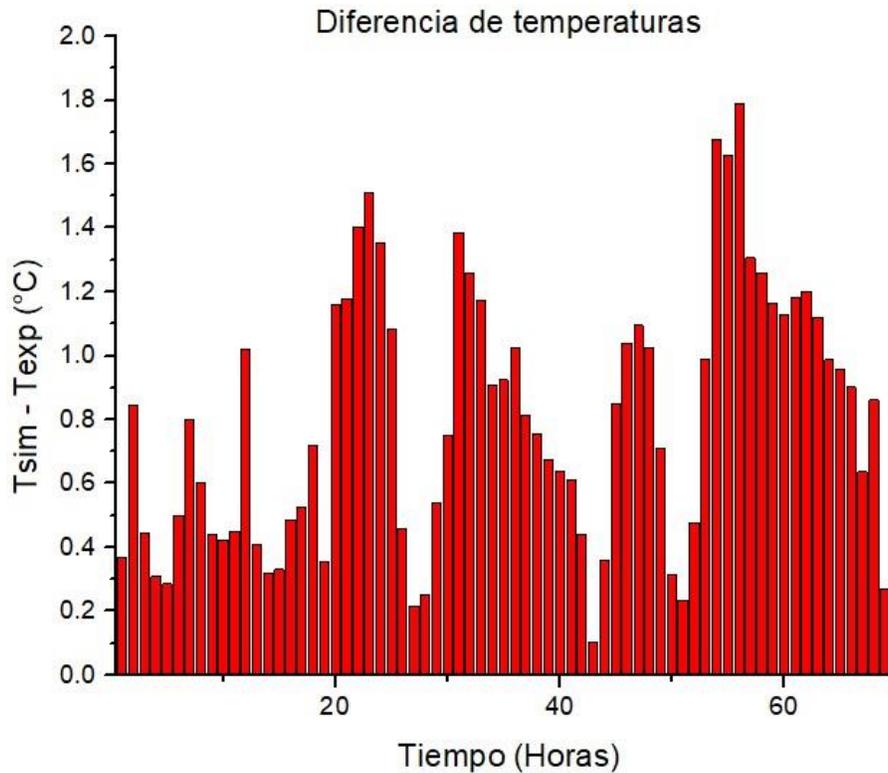


Figura 3.7. Diferencia de la temperatura predicha y la temperatura observada (error absoluto).

3.1.4 Análisis del comportamiento térmico de la piscina

Esta sección de resultados se divide en: simulación del comportamiento de la piscina sin calentamiento y el estudio del perfil de demanda para una temperatura de consigna. El comportamiento de la temperatura sin calefacción se observa en la gráfica de la figura 3.8, específicamente la línea negra, y se obtuvo al resolver el modelo matemático por medio del método numérico llamado bisección. Encontrando el valor la temperatura en la piscina que le corresponde para que se cumpla el balance de energía, es decir, que las ganancias sean igual que las pérdidas. La tabla 3.6 y la gráfica 3.8 define las temporadas donde se va requerir calentamiento, ya que se muestra como la temperatura de la piscina va variando conforme cambian las condiciones ambientales, y en el mes de mayo la temperatura de la piscina supera la temperatura de consigna (24° C), por lo que ya no será necesario el sistema de calefacción.

En la tabla 3.5 están los resultados de las temperaturas máximas, mínimas y medias de la piscina en cada mes. La temperatura de la piscina supera la de consigna a mitad del mes de mayo, como se mencionó anteriormente, ajustándose con el mes de mayor radiación solar disponible, y hasta

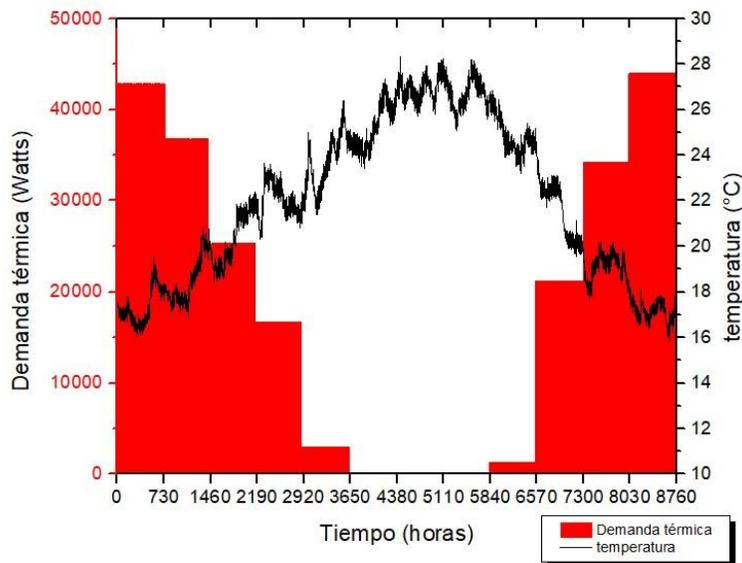
finales de septiembre la temperatura de la piscina desciende los 24 °C marcando la temporada en que se va requerir el calentamiento.

Tabla 3.5. Temperaturas diarias de cada mes

Mes		Temp_media	T_max	T_min
Enero				
Febrero		17.33	19.58	16.00
Marzo		18.44	20.87	16.87
Abril		20.37	22.42	18.44
Mayo		22.10	23.67	20.32
Junio		23.71	26.44	21.37
Julio		25.20	27.36	23.41
Agosto		26.93	28.32	25.72
Septiembre	Octubre	26.73	28.21	25.05
	Noviembre	24.82	26.84	23.17
	Diciembre	21.49	23.83	18.93
		19.07	20.21	17.66
		17.14	18.12	15.85

La gráfica de barras muestra la demanda de energía térmica que se va requerir para mantener el vaso del agua a 24 °C frente a las condiciones ambientales. Los meses con mayor demanda se ajustan con los meses (enero y diciembre) donde se presentan las temperaturas más bajas. Sin embargo, en febrero se encuentra el día con mayor demanda, consecuencia de las condiciones de un frente frío que se presentó en la región noroeste del país. En los meses de mayo y septiembre la demanda térmica decrece, ya que la ganancia de calor por la radiación solar sobrepasa la promedio, lo que favorece al contenido energético de la masa de agua que se traduce en una temperatura de confort para el usuario. La figura 3.8 muestra que los meses que se va requerir calentamiento de agua son enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre. Debido a que los meses de mayo y septiembre se puede imponer por lapsos de tiempo cortos el disconfort del usuario. Mientras que los meses junio, julio y agosto no es necesario el calentamiento del agua de la piscina.

Mes	Wt
Enero	42825.408



Febrero	36318.855
Marzo	25157.294
Abril	16112.394
Mayo	2894.875
Junio	-6239.488
Julio	-16591.967
Agosto	-12565.568
Septiembre	2150.476
Octubre	22260.045
Noviembre	33936.830
Diciembre	44025.366

Tabla 3.6. Demanda promedio diaria de cada mes

Figura 3.8. Demanda de energía térmica (para una $T_p = 24\text{ }^\circ\text{C}$) y perfil de la temperatura sin calentamiento.

Las pérdidas de evaporación se ven afectadas por las condiciones de velocidad de viento, la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente. También se observa que la humedad es la fuerza motriz para la transferencia de masa, ya que el aire ambiente no se encuentra saturado por lo que tiene posibilidad de recibir agua que se transforma en energía. Estas pérdidas tienen el mayor aporte en las pérdidas totales de calor.

3.2 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON CALDERA

3.2.1 Descripción física y operativa

Actualmente el sistema de calefacción con el que cuenta el complejo acuático, está constituido por una caldera de gas en forma de respaldo. Dicho sistema se puede ver representado en la

figura 3.9. Este sistema aporta calor al vaso de agua de la piscina con el fin de mantener o elevar la temperatura de consigna que permita tener una sensación de confort para el usuario y no cause un choque térmico debido a la diferencia de temperaturas con el ambiente. Para la simulación de este sistema de climatización se tiene que respetar los datos técnicos de la caldera.

La caldera es de la marca Masstercal, modelo AFJ II 2400 EE de 2,300,000 BTU, la cual funciona con gas L.P. o natural. Este sistema requiere un gasto mínimo de 475 gpm y cuenta una eficiencia térmica superior al 89%.

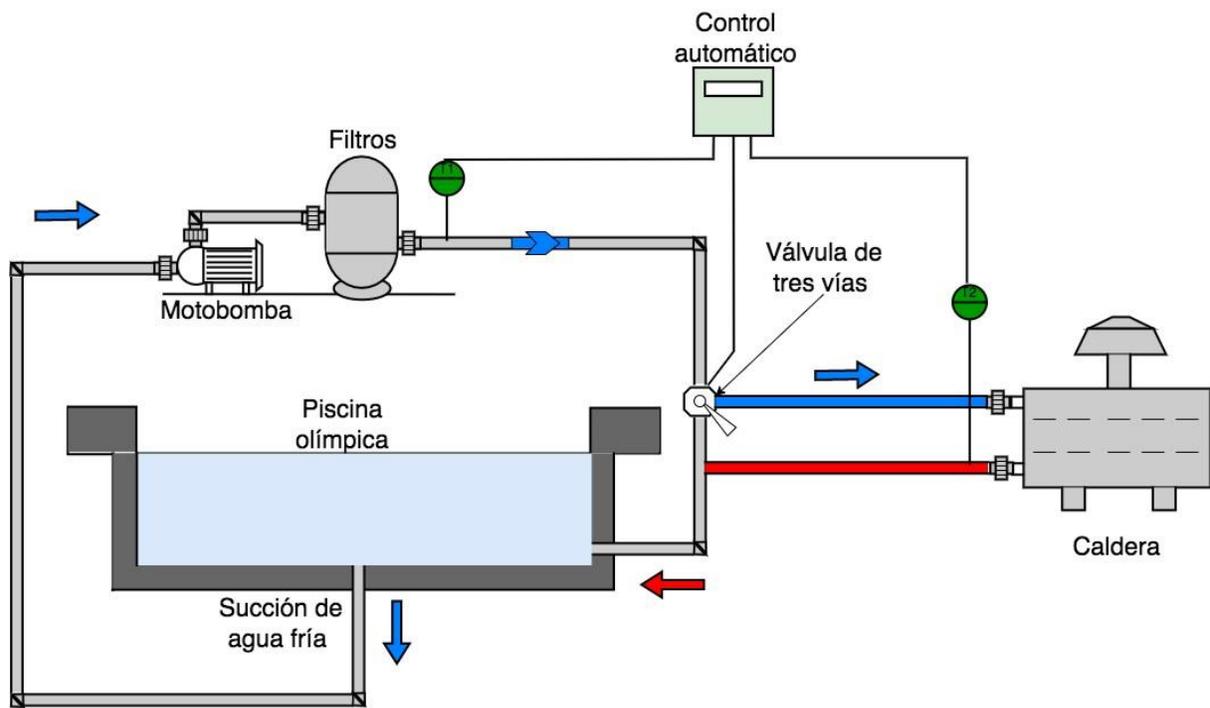


Figura 3.9. Diagrama del sistema de climatización por medio de la caldera.

3.2.2 Metodología para la simulación operativa

La simulación del sistema de calefacción actual, está constituida por una caldera, el sistema de filtrado, motobomba y el sistema de control. Esta configuración se simuló en el software TRNSYS, ya que cuenta con todos los módulos para representar los diferentes dispositivos del sistema. En esta sección se muestra el diagrama de flujo de la metodología de simulación (figura 3.10), se describen los módulos utilizados, así como los datos que se necesitan para la correcta resolución de los modelos matemáticos.

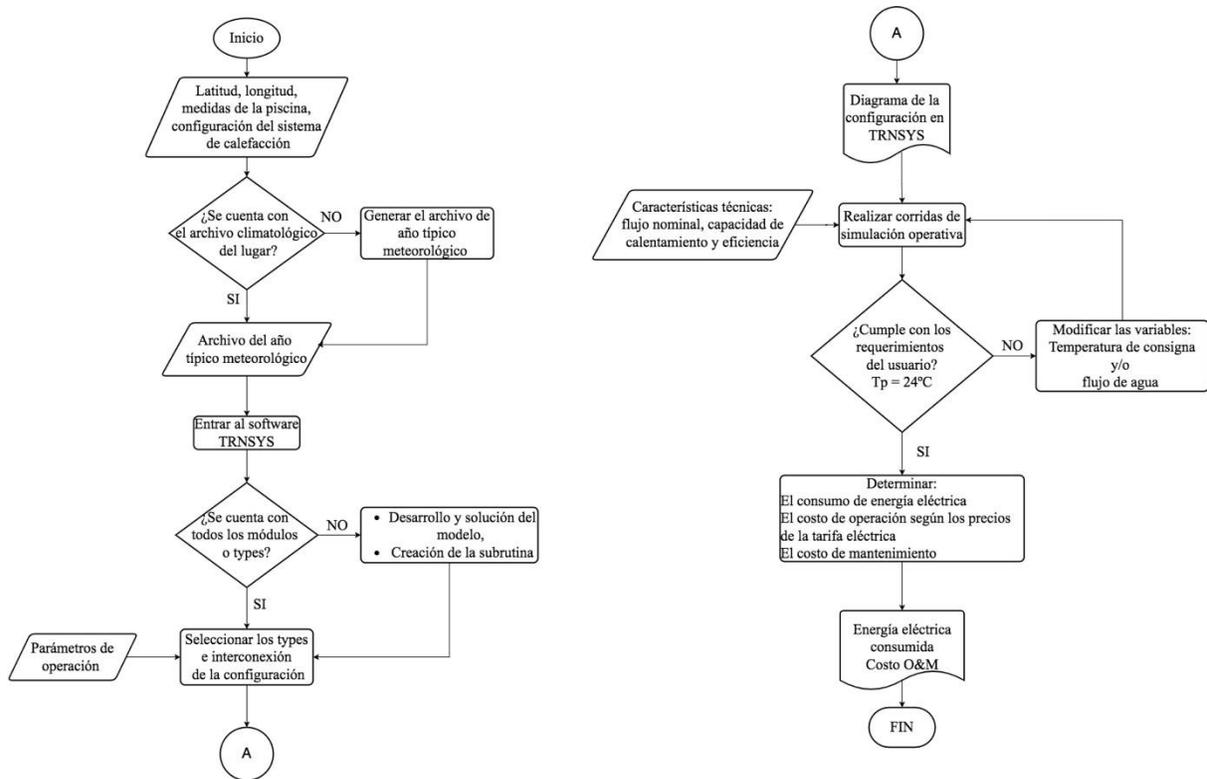


Figura 3.10. Diagrama de flujo de la metodología de simulación.

3.2.2.1 Archivo de un año típico meteorológico (Type 15)

Este módulo permite incorporar un archivo climatológico del sitio de estudio en el formato requerido (tmy) y está representado en el software por la imagen de la figura 3.11. Una vez anexado el archivo externo, se puede utilizar las variables meteorológicas como variables de entrada para los componentes que tienen interacción con el ambiente. El formato tmy2 cuenta con los valores horarios de radiación solar, temperatura bulbo húmedo y seco, humedad relativa, velocidad de viento, entre otras variables climatológicas de un año típico. Este type es necesario debido a que el modelo de la piscina interactúa con las variables meteorológicas del lugar, en este caso, las de la localidad de Mexicali. Es decir, el comportamiento térmico de la piscina depende mucho de la temperatura ambiente, la humedad, radiación y velocidad de viento. Son factores que tienen un impacto en los diferentes modos de transferencia de calor.



Figura 3.11. Módulo para el archivo climatológico.

3.2.2.2 Piscina (Type 155)

Para modelar el comportamiento térmico de una piscina, se requiere generar un componente o type con el modelo matemático que describa los fenómenos de transferencia de calor que están involucrados en el sistema. Para ello se utilizó el type de Matlab (figura 3.12) en el cual se incorporó un documento externo con la programación en el lenguaje que procesa Matlab.



Figura 3.12. Componente que representa la piscina.

Los datos de entrada necesarios para la resolución del modelo a través del type 155 se muestran en la tabla 3.7, y provienen del TMY (type 15-2), excepto el calor de calefacción que provienen de la caldera (type 6) por lo que varían en cada salto de tiempo. La tabla 3.8 proporciona los parámetros físicos de la piscina.

Tabla 3.7. Datos de entrada type piscina

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Temperatura ambiente	10	° C	
Velocidad de viento	2	m/s	
Radiación solar global	0	W/m ²	Archivo TMY (type 15-2)
Humedad relativa	55	%	
Temperatura del cielo	8	° C	
Calor de calefacción	90	kW	Caldera (type 6)

Tabla 3.8. Parámetros fijos de la piscina

Nombre	Valor	Unidades	Tipo de propiedad
Ancho de la piscina	50	m	
Longitud	25	m	Dimensiones espaciales
Profundidad promedio	1.8	m	
Emisividad del agua	0.95	-	Propiedad térmica
Constante de stefan-boltzmann	5.6697 x10 ⁻⁸	W/(m ² K ⁴)	Propiedad térmica
Absortividad	0.85	-	Propiedad óptica
Coefficiente "a" para he	0.0423	W/m ² Pa	

Coeficiente "b" para he	0.0565	W/m ³ Pa	Factor empírico para he
Coeficiente "z" para he	0.5	-	

3.2.2.3 Bomba de circulación (Type 3d)

Este módulo hace la función de una bomba de circulación (figura 3.13) definida por el caudal de impulsión y las características del fluido (agua). Siendo solamente utilizadas en los circuitos primario (circuito de la piscina) y secundario (Circuito de colectores solares) del sistema. En la tabla 3.9 se encuentran los datos de entrada de la bomba hidráulica.



Figura 3.13. Bomba de circulación

Tabla 3.9. Datos de entrada de la bomba de la caldera

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Temperatura de entrada	15	° C	Bomba hidráulica de la Piscina
Flujo de entrada		kg/s	(Type 3d)
Función de control	1	-	Control PID (Type 23)

3.2.2.4 Válvula de desviación de flujo (Type 649)

El type funciona como una válvula de desviación que permite redireccionar o separar el flujo másico de entrada en flujos másicos de salida fraccionarios (figura 3.14). Este type permite dividir el flujo de entrada hasta en 100 flujos con una fracción distinta, y en otros casos se utiliza mezclarlos.



Figura 3.14. Componente que representa una válvula de desviación.

3.2.2.5 Caldera (Type 6)

Este componente modela el funcionamiento de una caldera o boiler (figura 3.15), incrementando la temperatura de un fluido a través de la combustión de un combustible, utilizando un sistema de control el cual puede ser interno, externo e incluso una combinación de ambos. La caldera está diseñada para añadir calor al flujo a una tasa menor o igual a Q_{max} , que es una cantidad determinada por el usuario con base a los datos técnicos del equipo reportados por el proveedor. Dichos datos se observan en la tabla 3.10 y 3.11.



Type6

Figura 3.15. Type de la caldera.

Tabla 3.10. Datos de entrada de la caldera

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Temperatura de entrada	15	° C	Bomba hidráulica
Flujo de entrada		kg/s	(type 3d)
Función de control	1	-	Control PID (Type 23)
Temperatura de consigna	24	° C	Piscina (Type 155)

Tabla 3.11. Parámetros fijos de la caldera

Nombre	Valor	Unidades	Tipo de propiedad
Calor máximo	626	kW	
Calor específico del fluido	4.19	kJ/kg.K	Propiedad térmica
Eficiencia de la caldera	0.89	-	

3.2.2.6 Control PID (Type 23)

Este componente simula el funcionamiento de un controlador proporcional, integral y derivativo. Será utilizado para dar las señales a los actuadores (bombas, válvulas de tres vías o mezcladoras) para direccionar el flujo dependiendo de la variable a controlar, en este caso será la temperatura de la piscina. El type 23 está representado en el interfaz gráfico como la figura 3.16. Las variables necesarias para el funcionamiento se observan la tabla 3.12.



Type23

Figura 3.16. Type del control PID.

Tabla 3.12. Datos de entrada para el control PID de la caldera

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Punto de consigna	24	°C	Usuario
Variable a controlar	Tp	°C	Piscina (type 155)
Señal de control mínima	0	-	
Señal de control máxima	1	-	
Señal On/Off	1	-	

3.2.3 Análisis térmico y operativo del sistema de calefacción con caldera

El análisis operativo muestra que el mayor aporte de energía de la caldera se da en los meses de enero y diciembre, donde las temperaturas mínimas son cercanas a los 3 °C, por lo que mantener la temperatura de consigna en estos meses tiene que ser mayor, mientras que en los meses de la temporada de verano se supera la temperatura de consigna (24°C), dando como resultado un aporte nulo de energía térmica por parte de la caldera (Figura 3.17).

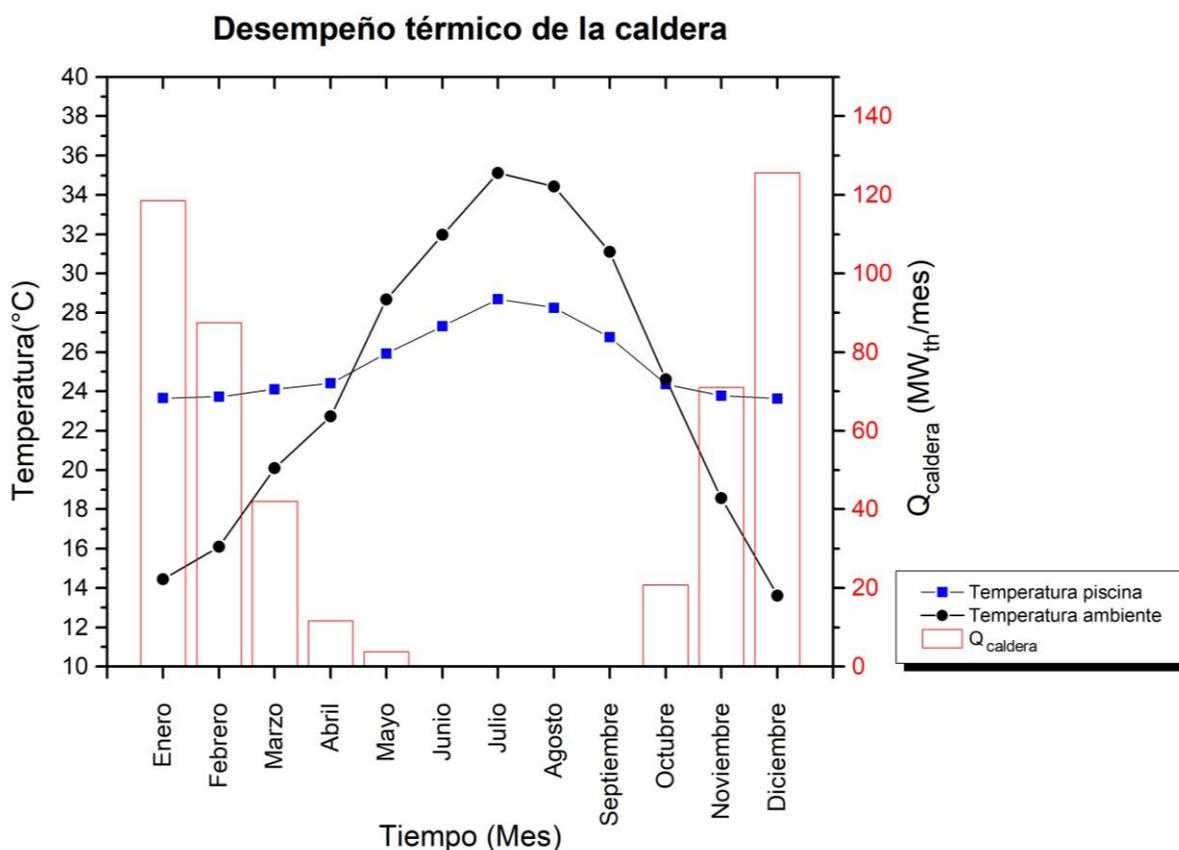


Figura 3.17. Generación de energía térmica a través de la caldera de gas LP.

En la tabla 3.13 se observa el consumo de gas LP en litros por mes. Este cálculo se realizó por medio del poder calórico inferior del gas LP de 10,500 kcal/kg y su densidad de 0.56 kg/Lts (CONUEE, 2023). En este escenario se proyecta el costo mensual del gas consumido para alimentar la caldera para el calentamiento de la alberca, dando el costo operativo del sistema de calefacción.

Tabla 3.13. Desempeño energético y consumo de la caldera

Mes	Temperatura de la piscina	Temperatura ambiente (°C)			Calor de la caldera	Consumo de la caldera	
		Temp_media	T_max	T_min	MWh th/mes	Lts/mes	\$/mes
Enero	23.65	14.44	26.30	3.05	118.54459	17346.64	190812.81
Febrero	23.73	16.09	28.30	4.65	87.52844	12808.05	140884.66
Marzo	24.11	20.09	34.50	6.70	42.05073	6153.29	67687.89
Abril	24.42	22.72	36.65	9.60	11.72915	1716.33	18879.96
Mayo	25.92	28.66	42.55	14.55	0.37601	55.02	605.23
Junio	27.32	31.98	44.45	18.25	0	0	0
Julio	28.70	35.10	47.00	23.75	0	0	0
Agosto	28.26	34.43	45.10	23.80	0	0	0
Septiembre	26.77	31.11	42.90	18.05	0	0	0
Octubre	24.36	24.61	39.15	7.75	20.70635	3029.96	33329.94
Noviembre	23.78	18.57	32.20	5.20	70.97813	10386.24	114251.11
Diciembre	23.63	13.60	26.05	2.70	125.63092	18383.59	202219.08
Anual					477.54432	69879.11	768670.66

Capítulo 4

4 DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PROPUESTAS DE CALEFACCIÓN CON ENERGÍA SOLAR Y BIOGÁS PARA LA PISCINA

4.1 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN TERMOSOLAR

4.1.1 Descripción física y operativa

La simulación del sistema de calentamiento de agua termosolar para el complejo acuático de la UABC, está formado por el sistema principal que consta de los vasos de agua (piscina y fosa de clavados), sus bombas de circulación y el circuito del campo de captación (ver figura 4.1). El circuito de agua caliente se compone por el campo de colectores solares, una bomba, válvulas de tres vías, de mezclado, y un control global que contempla la diferencia de temperaturas a la salida de la piscina y los colectores, y otro que tome en cuenta la temperatura de consigna (24° C). El simulador utiliza como datos de entrada las condiciones presentes en el archivo climatológico del lugar donde se toman las variables como radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad de viento, para que puedan alimentar las subrutinas y resuelvan los modelos, con la finalidad observar el desempeño de los colectores solares y la piscina. Los colectores solares que se utilizaron en la simulación para el análisis operativo, son de la marca mexicana módulo solar. El modelo del colector lleva por nombre MS 2.5 BLUE, de los cuales se tomaron las características de la ficha técnica dada por el proveedor para su correcta simulación en TRNSYS.

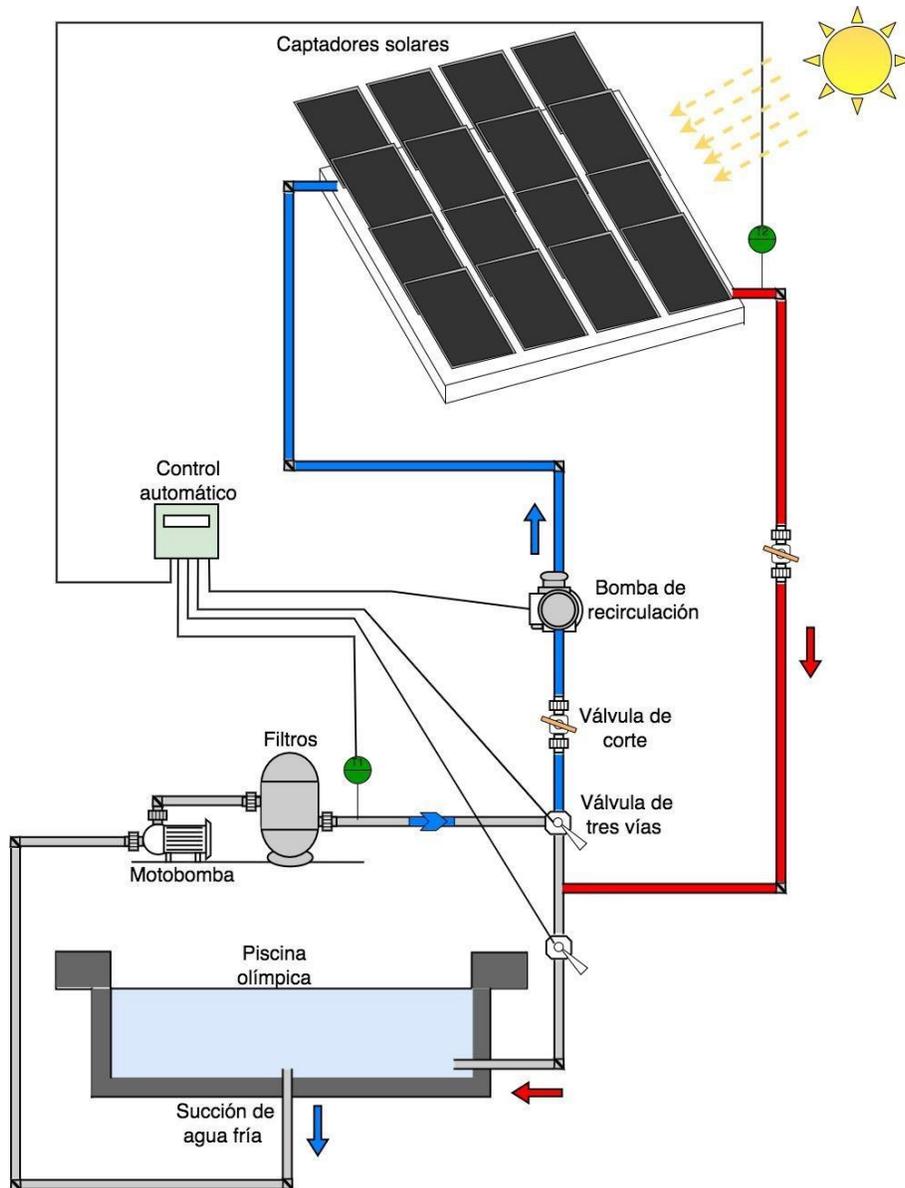


Figura 4.1. Diagrama del sistema de calefacción termosolar.

4.1.2 Metodología para la simulación operativa

En esta sección se describe cada uno de los módulos que se utilizaron para la simulación de la configuración propuesta y los pasos que se siguieron, tal como se muestra en la figura 4.2. Cada uno de los módulos es la representación de algún equipo o fenómeno, excepto el módulo del TMY que básicamente son los datos que proyectan como serían las principales variables climatológicas que tienen inferencia en el sistema.

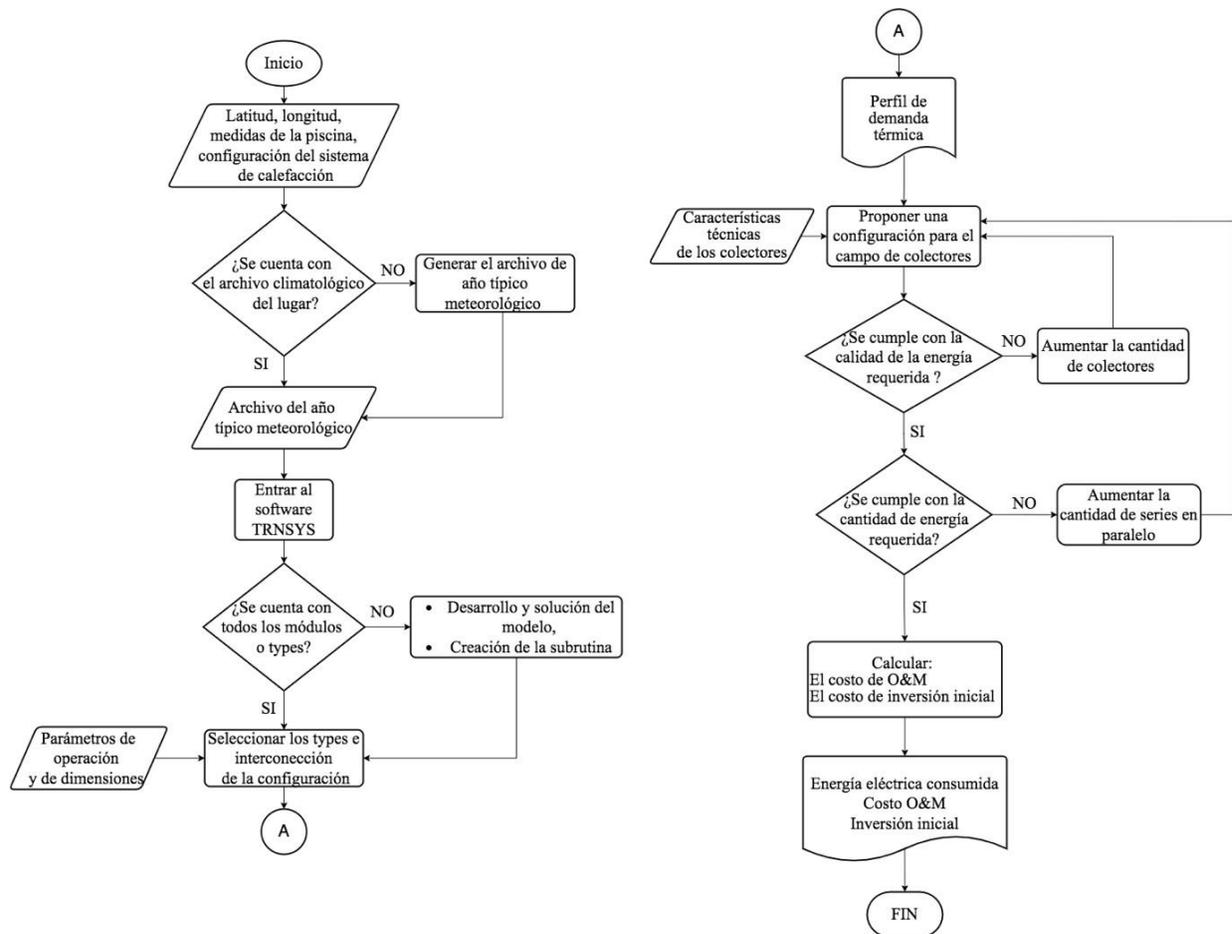


Figura 4.2. Diagrama de flujo de la metodología de simulación.

4.1.2.1 Type15 (TMY)

El archivo climatológico de Mexicali es indispensable debido a que el comportamiento térmico tanto de la piscina como de la generación de energía termosolar a través del campo de colectores, va depender de las variables contenidas en este archivo climatológico. La función de este type15 es leer el archivo TMY para poder usar los valores de las variables que son necesarios para la resolución de los modelos matemáticos del type de la piscina y del colector solar.

4.1.2.2 Piscina (Type 155)

Las simulaciones en esta tesis giran alrededor de este módulo por lo que se encuentra en todas en este caso el calentamiento del agua será por un campo de colectores y la caldera a biogás por lo que el control será muy importante para mantener la temperatura de consigna de la piscina a partir de tener controlada la adición de calor. Las variables de entrada del type se muestran en la tabla 3.7 y los parámetros fijos en la tabla 3.8.

4.1.2.3 Bomba de circulación piscina (Type3d)

Esta bomba simula la recirculación de la piscina con el flujo necesario para la correcta filtración y en el tiempo establecido. El vaso de agua tiene un volumen muy grande, por lo que se ocupa un caudal de entre 1,500 y 1,350 gpm que resultan en tiempos de 6 horas 10-45 minutos.

4.1.2.4 Colector solar (Type1)

Este componente modela el rendimiento térmico teórico de un colector de placa plana. El conjunto de colectores puede estar formado por colectores conectados en serie y en paralelo. El usuario es quien proporciona la información de las características así como la ecuación de eficiencia, resultado de las pruebas que se llevaron a cabo en su respectiva certificación reportada por el proveedor. Este modelo permite el análisis teórico de una placa plana. Para evaluar el rendimiento térmico se utiliza el modelo de estado estacionario de Hottel-Whillier (1958). Este type tiene variables de entrada provenientes del tmy de la bomba de los colectores, mientras que los parámetros fijos son las características dadas por el fabricante.

Las variables de entrada y los parámetros usados en la simulación se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos de entrada del colector solar

Nombre		Unidades	Origen de la variable
Temperatura de entrada	24	° C	
Flujo de entrada	0.2	kg/s	Bomba hidráulica (type 3d)
Temperatura ambiente	20	° C	
Radiación incidente	600	kJ/hr.m ²	Archivo TMY (type 15-2)
Inclinación del colector		grados	

4.1.2.5 Type 3d (Bomba de circulación del campo de colectores)

Este módulo o type en la simulación representa la bomba hidráulica para el campo de colectores, respetando el flujo nominal de la ficha técnica y puedan operar de la mejor manera, los datos de entrada se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Datos de entrada de la bomba de los colectores

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Temperatura de entrada	15	° C	Piscina (Type 155)

Flujo de entrada	0.02	kg/s	
Función de control	0	-	Control (Type Equa)

4.1.2.6 Type (Control diferencial)

El control diferencial en el campo de colectores, se basa en monitorear la temperatura a la salida de los colectores y compararla con la temperatura de la piscina, y si la diferencia es menor, indica que el colector no está recibiendo la suficiente radiación solar como para elevar la temperatura de la piscina, por lo que manda una señal de 0 al actuador para que se apague. En este caso el actuador es la bomba que hace circular el flujo de agua por el conjunto de colectores, en el caso contrario donde la temperatura a la salida de los colectores sea mayor que la de la piscina se encenderá la bomba para que adicione calor a la piscina. Los datos de la tabla 4.3 corresponden al funcionamiento del módulo de control diferencial.

Tabla 4.3. Datos de entrada del control por diferencia de temperaturas

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Temperatura de entrada superior	24	° C	Colector solar (Type 1b)
Temperatura de entrada inferior	23	° C	Piscina (Type 155)
Temperatura monitoreada	24	° C	
Función de control a la entrada	0	-	Control diferencial (Type 2)

4.1.2.7 Type (Control PID)

La simulación de estas configuraciones requiere un control que respete la temperatura de consigna, por lo que se monitorea la temperatura de la piscina y si esta cumple con el criterio de que sean iguales, no será necesario la adición de calor por los sistemas de calentamiento ya sea de campo termosolar o la caldera de biogás, enviando una señal de control para apagar el flujo de la bomba de los colectores o apagar la caldera. En la tabla 4.4 se observan las variables de entrada que requiere el type de control PID.

Tabla 4.4. Datos de entrada para el control PID

Nombre	Valor	Unidades	Origen de la variable
Punto de consigna	24	°C	Usuario

Variable a controlar	Tp	°C	Piscina (type 155)
Señal de control mínima	0	-	
Señal de control máxima	1	-	
Señal On/Off	1	-	

4.1.3 Análisis térmico y operativo del sistema termosolar

El desempeño de los sistemas de calentamiento agua termosolar se ve modificado por las condiciones ambientales, y son necesarios evaluar su comportamiento para determinar si abastece la demanda de energía térmica del complejo acuático y establecer sus costos operativos, es decir, cuánto es el costo requerido para cubrir dicha demanda. Este análisis permite cuantificar los costos operativos de los sistemas, y en el caso del sistema termosolar cuantifica el número de colectores solares que serán necesarios para cubrir con los requisitos de energía térmica y proceder a cotizar y determinar el costo de inversión inicial. En el caso 2, las condiciones ambientales juegan un papel muy importante en el rendimiento del campo de colectores, ya sea por la cantidad de radiación y la temperatura ambiente, de ahí viene la importancia de evaluar operativamente el diseño del campo de colectores. En la figura 4.1 se observa que la mayor generación se dio en el mes de enero ya que se cuenta con mayor demanda, es decir, enero y diciembre aunque son los meses donde se requiere más energía debido a las bajas temperaturas. En este sistema se tiene un sistema de control más avanzado, ya que se debe respetar primeramente que la temperatura de la piscina tiene que ser menor a 24 °C y la otra condición es que la temperatura del colector tiene que ser mayor que la de la piscina, traduciéndose a un sistema de control predictivo. Reduciendo el aporte de calor en los meses cercanos al verano (mayo y octubre), como se aprecia en la tabla 4.3.

Tabla 4.5. Desempeño energético de la piscina y el campo de colectores

Mes	Temperatura de la piscina	Temperatura ambiente (°C)			Calor de los colectores kWh th/mes
		Temp_media	T_max	T_min	
Enero	23.60	14.44	26.30	3.05	129524.75

Febrero	23.70	16.09	28.30	4.65	109576.83
Marzo	23.98	20.09	34.50	6.70	41384.62
Abril	24.23	22.72	36.65	9.60	15510.60
Mayo	25.03	28.66	42.55	14.55	0
Junio	26.53	31.98	44.45	18.25	0
Julio	28.04	35.10	47.00	23.75	0
Agosto	28.52	34.43	45.10	23.80	0
Septiembre	27.62	31.11	42.90	18.05	0
Octubre	25.50	24.61	39.15	7.75	21384.62
Noviembre	24.43	18.57	32.20	5.20	77230.73
Diciembre	23.70	13.60	26.05	2.70	108044.86
Anual					502657.03

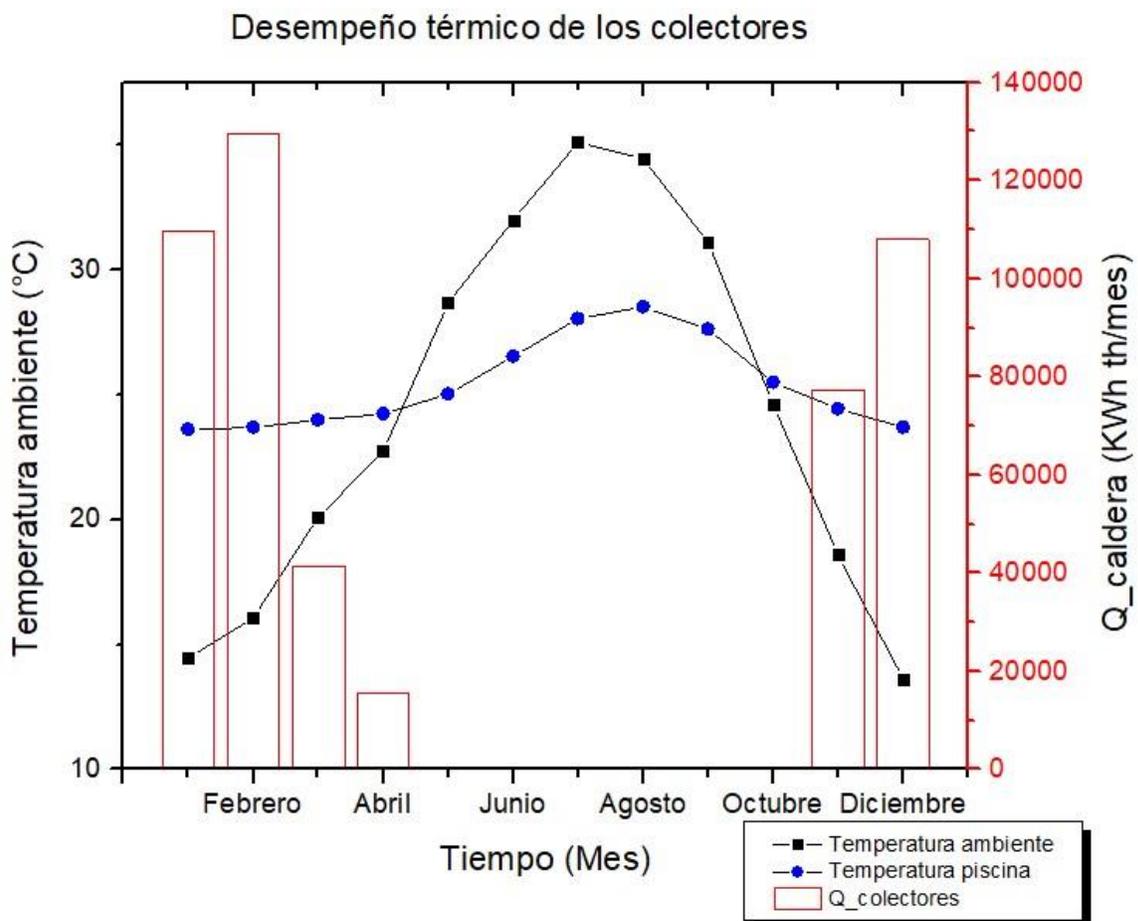


Figura 4.3. Aporte de energía térmica del campo de colectores.

4.2 ESTUDIO TÉRMICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN TERMOSOLAR-BIOGÁS

4.2.1 Descripción física y operativa

La simulación propuesta del sistema de calentamiento de agua para el complejo acuático de la UABC, se visualiza en la figura 4.4. Está formado por el sistema principal que consta de los vasos de agua (piscina), y sus bombas de circulación. El circuito de agua caliente se compone por el campo de colectores solares, una caldera activada con biogás, una bomba, válvulas de tres vías, de mezclado, y el control con base a las temperaturas a la salida de los colectores.

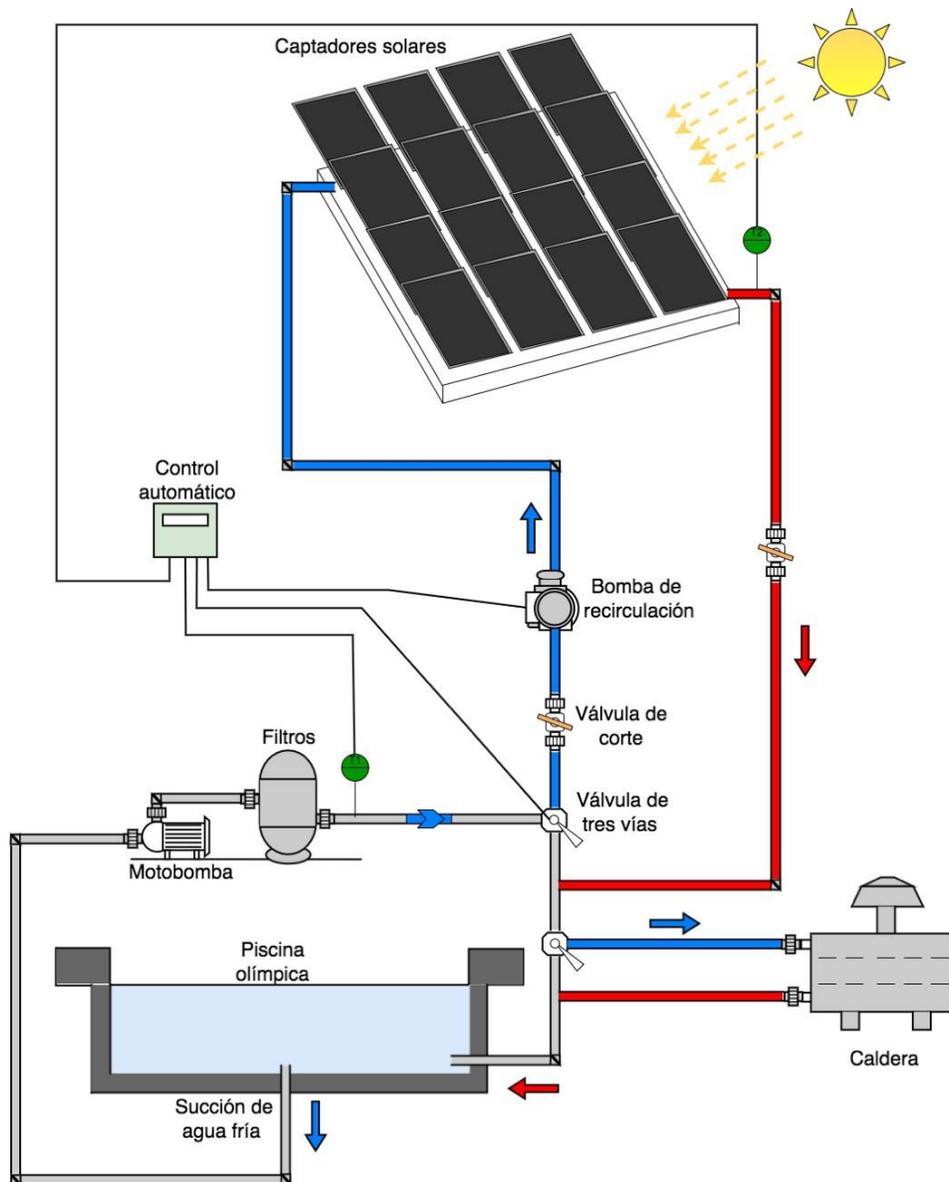


Figura 4.4. Diagrama del sistema termosolar- biogás.

4.2.2 Metodología para la simulación operativa

Para el desarrollo de estas simulaciones se utilizaron los mismos tipos descritos en las secciones anteriores, debido a que las partes principales de esta configuración son el campo de colectores, la caldera de biogás y la piscina la cual está situada en la parte de exterior del campus Mexicali. El funcionamiento operativo del sistema está determinado primeramente del perfil de la demanda térmica, el cual se ve afectada por las distintas pérdidas de calor producidas por los deltas de temperatura con respecto al ambiente, seguido de la disposición de la radiación solar y la generación de energía térmica. Para ello se simuló un solo colector, posteriormente se iba aumentando el número de colectores conectados en serie hasta que se obtuvo la calidad de energía deseada. Este primer paso es con el objetivo de encontrar el número mínimo de colectores conectados en serie que alcanzan la temperatura de 60 °C en los meses más fríos, y por consecuencia con mayor demanda (enero y diciembre). En cambio para encontrar el número de arreglos conectados en paralelo, depende que fracción solar se quiere usar, es decir, cuanta demanda se quiere cubrir con el campo de colectores. El rendimiento térmico del conjunto de colectores está determinado por el número de módulos en serie y las características de cada módulo. Este sistema de control censa las temperaturas a la salida de la piscina y del campo de colectores, las compara y si la temperatura de los colectores es mayor a 4 grados Celsius con respecto a la de la piscina, se manda una señal al actuador que este caso es una válvula de tres vías para dirigir el flujo de agua caliente que posteriormente va al volumen de agua. En el caso de una mañana donde la temperatura a la salida de los colectores sea 4°C más fría con respecto a la de la piscina, se manda una señal de OFF bomba de los colectores y se abre una válvula que permite el flujo óptimo para la caldera de biogás. Otro de los escenarios para control sería cuando la temperatura a la salida de los colectores sea mayor pero no más de 4° C, por lo que el campo termosolar trabajará en serie con la caldera de biogás para obtener la calidad y cantidad necesaria de energía térmica.

4.2.3 Análisis térmico y operativo del sistema híbrido (Termosolar-biogás)

La contribución del campo de colectores solares depende mucho del tamaño de este. En la tabla 4.6 se puede observar el desempeño térmico para diferentes números de arreglos conectados en paralelo, cada uno con intervalos de diferencia de 10 series.

La figura 4.3 muestra de manera gráfica los datos de la tabla 4.6, los cuales fueron recolectados de las simulaciones de las configuraciones del campo de colectores, dicha fracción fue calculada con la ecuación 5.

$$F_{solar} = \frac{Q_{demanda} - Q_{aux}}{Q_{demanda}} \quad [5]$$

donde:

F_{solar}	Fracción solar
$Q_{demanda}$	Demanda térmica
Q_{aux}	Calor del sistema auxiliar

Esta ecuación describe la aportación del campo de colectores para satisfacer la demanda de energía térmica, como se logra apreciar en la figura 4.5 después de cruzar una fracción solar del 60 % se requieren mayores incrementos de series conectadas en paralelo para lograr un incremento significativo en contribución de la energía requerida.

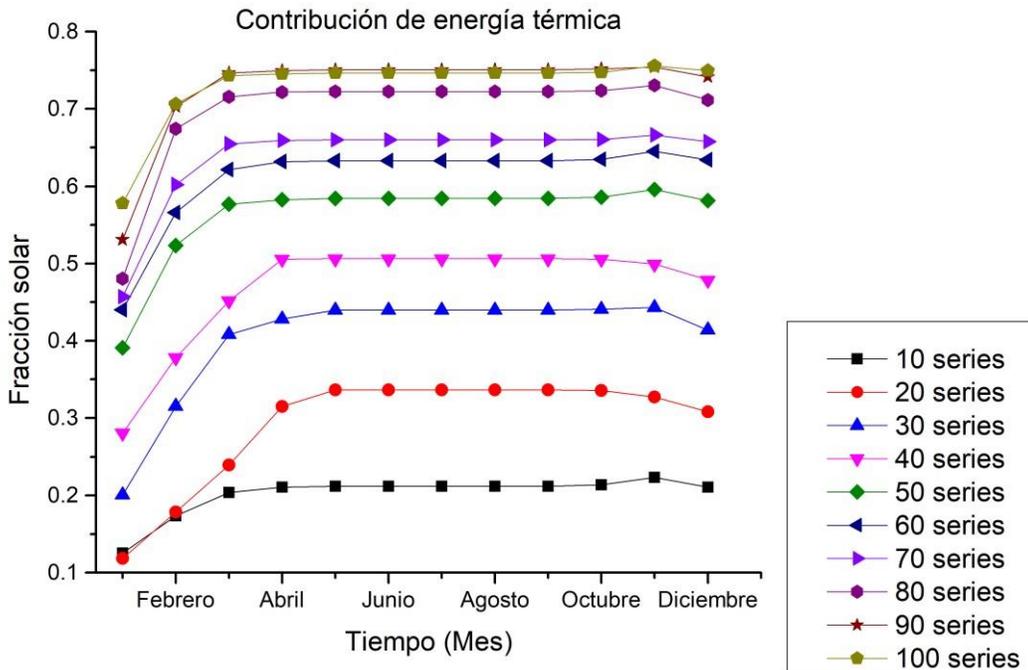


Figura 4.5. Fracción solar para diferentes tamaños del campo de colectores solares.

Tabla 4.6. Aportación solar para diferentes áreas de captación

	Número de series conectadas en paralelo								
	20	30	40	50	60	70	80	90	Mes
Enero	9.58%	13.05%	17.45%	20.83%	24.55%	25.96%	29.04%	34.72%	37.19%
Febrero	15.14%	20.67%	28.89%	32.57%	35.29%	41.34%	41.44%	52.42%	49.50%
Marzo	20.76%	36.42%	36.62%	39.67%	44.22%	49.97%	65.92%	52.56%	52.55%
Abril	21.61%	47.52%	44.48%	54.52%	49.98%	62.08%	70.09%	67.34%	100.00%
Mayo	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Junio									
Julio									
Agosto									
Septiembre	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Octubre	55.63%	57.88%	61.04%	66.09%	72.41%	78.40%	83.54%	89.02%	93.31%
Noviembre	15.12%	20.14%	30.15%	35.34%	45.95%	53.66%	60.32%	66.76%	75.82%
<u>Diciembre</u>	<u>8.50%</u>	<u>11.83%</u>	<u>14.68%</u>	<u>17.76%</u>	<u>20.50%</u>	<u>24.00%</u>	<u>23.33%</u>	<u>28.96%</u>	<u>30.61%</u>
	<u>38.48%</u>	<u>45.28%</u>	<u>48.15%</u>	<u>51.86%</u>	<u>54.77%</u>	<u>59.49%</u>	<u>63.74%</u>	<u>65.75%</u>	<u>71.00%</u>

A partir de la demanda térmica de la piscina y la aportación de calor por parte del sistema termosolar, se determina un consumo estimado de kilogramos de biogás, considerando el poder calorífico inferior del biogás, cuyos valores pueden rondar entre 6.0-6.5 kWh/m³, para una composición 48-65% metano (CH₄), 36-41% dióxido de carbono y una densidad de 1.2 kg/m³ (Deublein y Steinhäuser, 2008). En la figura 4.6 se observa la demanda de combustible para el caso actual (caldera activada con gas LP) y para el caso híbrido, donde el 60 % de la demanda es cubierta con una caldera que utiliza biogás. Por lo que las cantidades difieren por su poder calorífico y densidades. Cabe señalar que la demanda de biogás en los meses de enero y diciembre supera las 18 toneladas (18,000 kg de biogás) y solo para cubrir parcialmente los requerimientos de energía térmica. Mientras que el gas LP con 10 toneladas, tiene la capacidad de cubrir completamente la demanda de energía térmica en el mes de diciembre. Sin embargo, la huella de carbono generada por la combustión de este combustible fósil es de 103 toneladas de CO₂ al año y para el mes de diciembre 27 toneladas de CO₂. La determinación de la huella de carbono fue considerando un coeficiente promedio de dióxido de carbono de gas LP de 235.7 de CO₂ por barril de 42 galones (EPA, 2021).

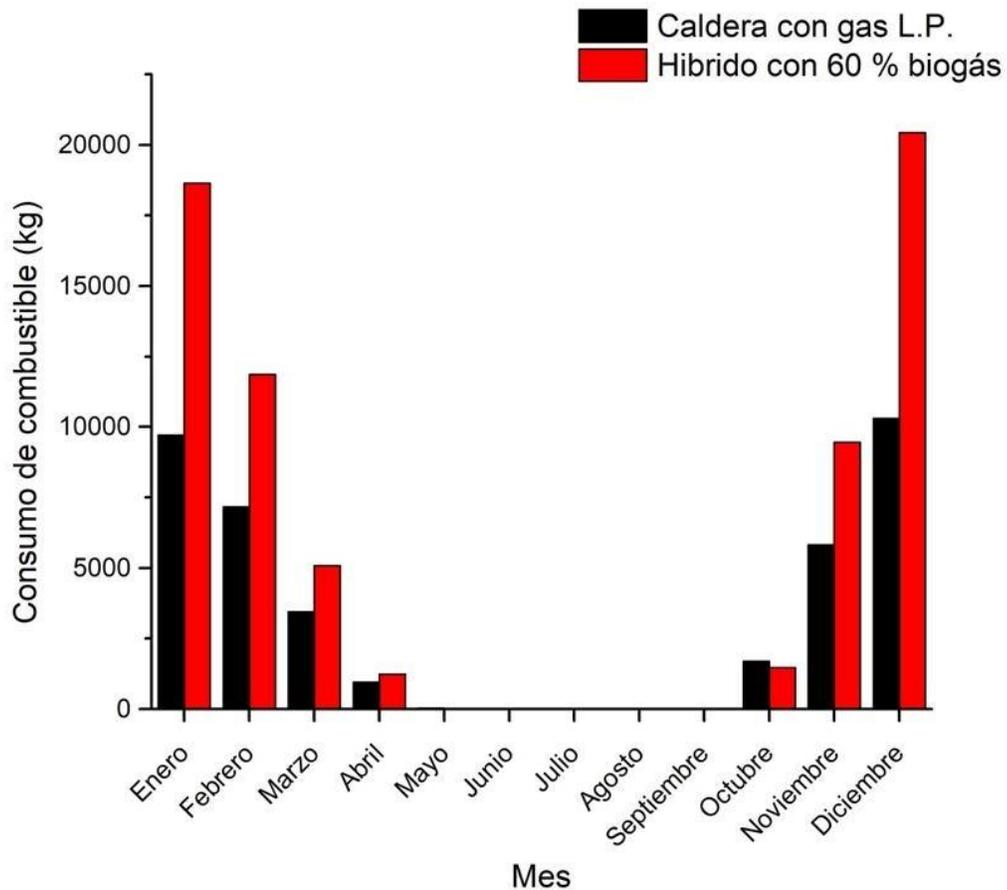


Figura 4.6. Consumo de biogás del sistema propuesto con 60% biogás.

En la tabla 4.7 se observa el consumo anual de biogás que se requiere para los diferentes arreglos y fracciones solares del campo de colectores. En el caso de conocer la capacidad de producción de biogás, se podría seleccionar la fracción solar y el área del campo de colectores.

Tabla 4.7 Demanda de biogás anual

Fracción solar (%)	Consumo anual de biogás (kg)
21	77828.78
31	72723.58
41	68190.69
48	64763.56
58	60744.64
63	57647.04
66	55232.86
71	53155.90
74	48596.83

4.3 DISEÑO DE LA RED HIDRÁULICA

A partir del estudio térmico de las distintas propuestas, el campo con mejor desempeño fue el de 30 bancos o series conectadas en paralelo. Cada uno de estos bancos consta de 4 colectores conectados en serie para lograr la temperatura necesaria para intercambiar calor con la masa de agua de la piscina. En esta sección se describe la interconexión del campo de colectores, el cálculo de diámetros de tuberías y la selección de los componentes hidráulicos (bombas y válvulas) necesarios para tener un correcto funcionamiento del sistema.

4.3.1 Ramaleos y diámetros de tubería

La correcta selección de los diámetros ahorra dinero en material, en bombeo y asegura el adecuado funcionamiento del sistema. Uno de los criterios a tomar en cuenta es el flujo recomendado por el fabricante del colector (MS 1.9) que para este caso es 2 LPM, y también que no se tiene que tener agua fluyendo por dentro de la tubería con una velocidad de 5 ft/s y tener un flujo laminar sin cavitación. La figura 4.7 muestra los diámetros para el correcto funcionamiento del sistema hidráulico para el campo de captación termosolar.

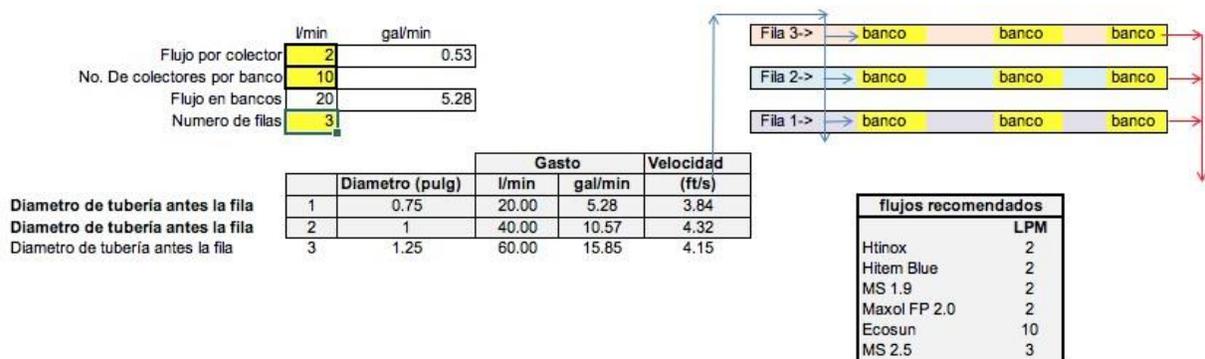


Figura 4.7. Cálculo para determinar los diámetros de tuberías para cada ramal.

4.3.2 Accesorios de seguridad y mantenimiento

En el campo de colectores es necesario incluir diferentes válvulas que cumplan ciertos objetivos. Por ejemplo, tener válvulas que protejan al colector del sobre calentamiento ya que en estancamiento el agua dentro del colector puede alcanzar los 180 °C. También se requieren válvulas de corte y de purga para el correcto mantenimiento. En este caso se colocará una válvula eliminadora de aire (VEA) y una válvula de alivio de presión (VAP) en el mismo lado

de la alimentación de agua fría por la parte de arriba (ver figura 4.8). La VEA con especificación de 180 °C y la VAP con set de 150 psi (1MPa) y 210 °F.

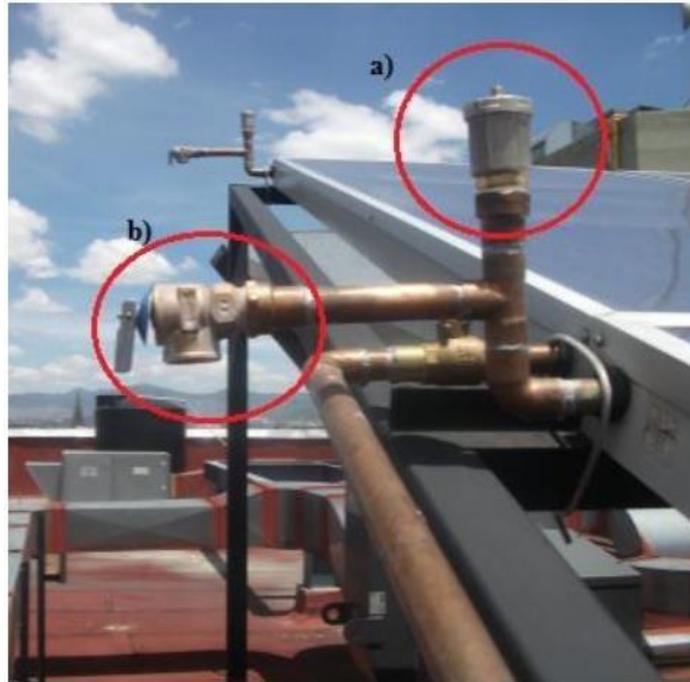


Figura 4.8. a) Válvula liberadora de aire, y b) Válvula de alivio de presión.

Fuente: García Valladares, O., Pilatowsky, I., 2017.

Válvula de drenaje: Se dejarán válvulas tipo esfera $\frac{3}{4}$ " en cada banco de colectores para drenar el sistema cuando sea necesario (ver figura 4.9).



Figura 4.9. Válvula de drenaje o drenado.

Fuente: García Valladares, O., Pilatowsky, I., 2017.

Válvulas de corte: se deberán colocar en la entrada y salida de cada serie o banco para independizar la operación de cada banco de colectores, tal como se observa en la figura 4.10, con el objetivo de favorecer el mantenimiento y las reparaciones.



Figura 4.10. Válvulas de corte por banco (serie).
Fuente: García Valladares, O., Pilatowsky, I., 2017.

La distribución de accesorios o válvulas de seguridad y el correcto mantenimiento se ilustra en la figura 4.11.

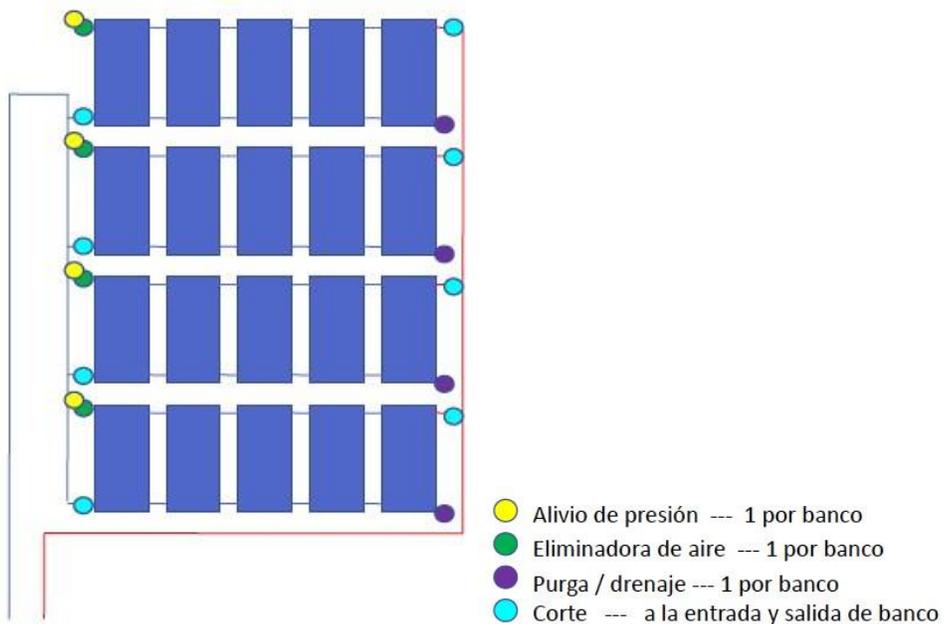


Figura 4.11. Distribución de válvulas para cada banco o serie.

4.3.3 Elementos de interconexión, soporte y fijación

Los elementos de interconexión son las tuberías que conectan todo los ramaleos, estos pueden ser de diversos materiales, los más utilizados son: conexiones metálicas rígidas, conexiones metálicas flexibles y mangueras flexibles. En este estudio se optó por las metálicas rígidas estas soportan las altas temperaturas, además que son más económicas que las mangueras flexibles, pero pueden crear problemas de dilataciones y alineamiento.

Soporte y fijación

En el diseño estructural se realizaron los cálculos de sombra tomando en cuenta el ángulo de inclinación, su orientación se muestra en la figura 4.12. Las estructuras metálicas deben estar protegidas superficialmente para garantizar su durabilidad frente a las acciones ambientales.

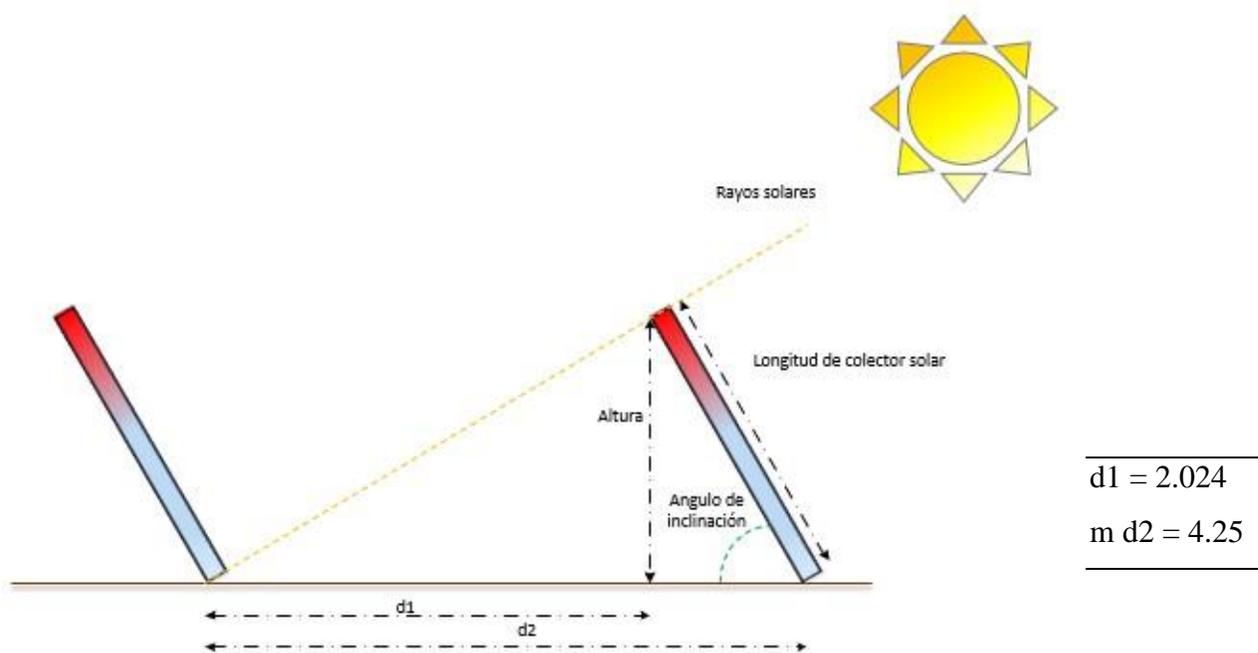


Figura 4.12. Cálculo de sombra para colectores solares.

La distribución espacial del campo de colectores se muestra en la figura 4.13, la cual está limitada por las dimensiones del techo del complejo acuático por otro lado la estructura está constituida de lámina y polines. El área correspondiente al techo de la alberca olímpica es de 3,128 m² (70 x 42.7m), cada colector solar tiene un área de 2 m², es decir 2.04 x 0.93m (largo x ancho) y un peso de 31.6 kg. La figura 4.13 fue diseñada para que cada banco, serie y ramaleo

tengan que recorrer la misma distancia y por consecuencia la misma caída de presión logrando el equilibrio, es decir, que pase el mismo flujo por cada colector solar. Los diámetros de tubería que corresponden a cada fila se muestran en la figura 4.7.

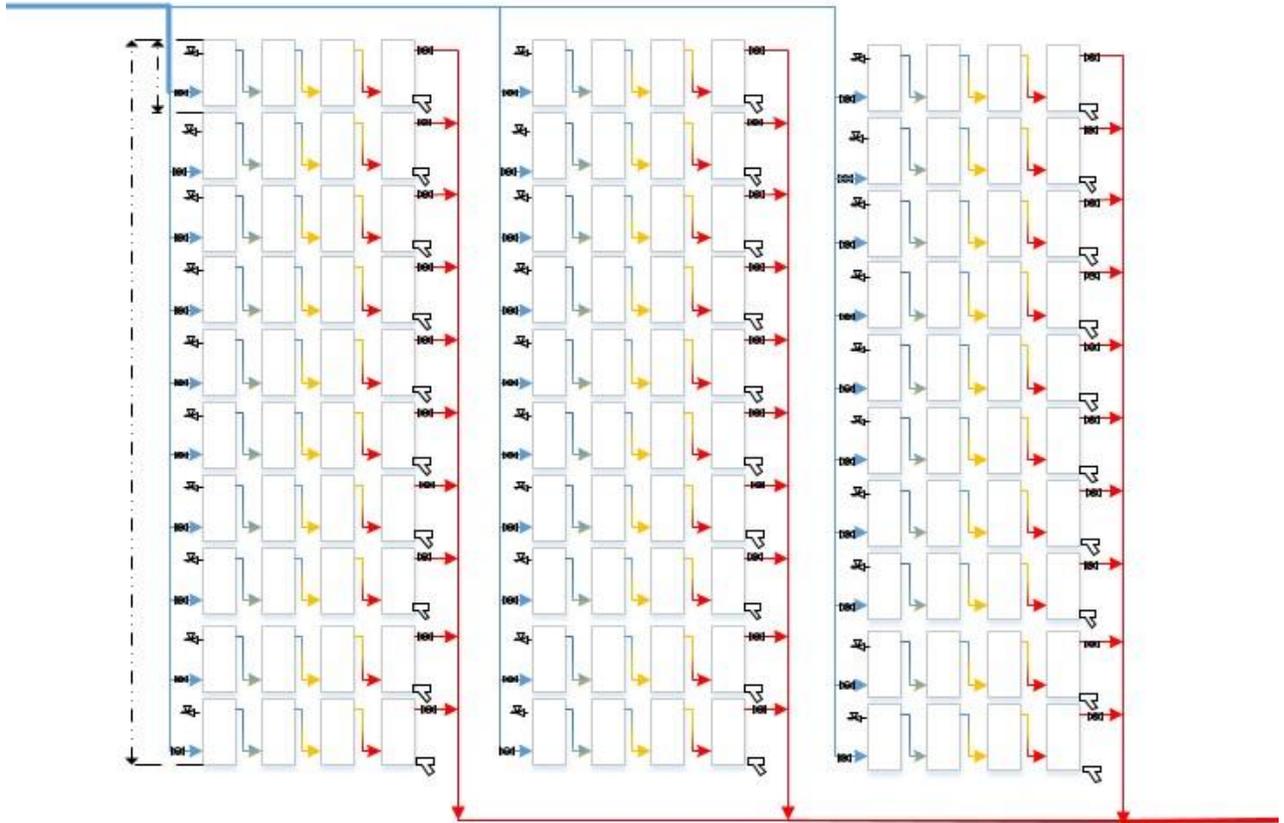


Figura 4.13. Diagrama de tuberías del campo de colectores de 30 series.

4.3.4 Dimensionamiento y selección de la bomba

Para este proyecto es necesario diseñar un sistema de tuberías para el campo de colectores, que entregará las razones de flujo especificadas a presiones confiables y al costo mínimo (costo de operación y mantenimiento). Una vez preparado el diagrama del sistema hidráulico, la determinación de los diámetros de las tuberías y las presiones a través del sistema, se determina la carga dinámica del sistema. Normalmente las redes hidráulicas incluyen varias tuberías conectadas, unas con otras en serie y/o en paralelo, como se muestra en la figura 4.10. Para realizar la selección de la bomba, se requiere calcular la carga dinámica del sistema, ya que esta carga final es la altura que deberá vencer la bomba. La ecuación para el cálculo de la carga de bomba útil necesaria, para el sistema propuesto es la siguiente:

$$h_{bomba,u} = A_{bombeo} + h_L \quad [6]$$

donde:

$h_{bomba,u}$	Carga de bomba útil
A_{bombeo}	Elevación
h_L	Pérdidas de carga total en las tuberías

$$h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad [7]$$

donde:

$h_{L,mayor}$	Pérdidas mayores
$h_{L,menor}$	Pérdidas menores f
	Factor de fricción
L	Longitud
V	Velocidad D Diámetro
g	Gravedad
K_L	Coefficiente de pérdidas

Cada accesorio en la red hidráulica representa una pequeña disminución en la presión, esta disminución puede ser imperceptible si se trata de pocos accesorios, pero este no es el caso. La NPSH (acrónimo de Net Positive Suction Head) es un parámetro importante en el diseño de un circuito de bombeo, que ayuda a saber la cercanía de la instalación a la cavitación influyendo también como criterio a respetar en la selección de la bomba. En las instalaciones de bombeo se debe tener en cuenta dos tipos de NPSH:

- NPSH disponible: es una medida de cuan cerca está el fluido de la cavitación.
- NPSH requerido: valor límite requerido para evitar que el fluido entre en cavitación depende de las características de la bomba, por lo que es un dato que debe proporcionar el fabricante en sus curvas de operación.

Para evitar la cavitación la NPSH disponible debe ser mayor que la NPSH requerida, según las especificaciones del fabricante.

$$NPSH_d = \frac{P_A}{\gamma} - Z_A - h_f - \frac{P_v}{\gamma} \quad [8]$$

donde:

γ	Peso específico del líquido
P_A	Presión en el nivel de aspiración

Z_A	Altura geométrica de aspiración
h_f	Pérdida de carga en la línea de aspiración
P_v	Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo

El modelado en computadora y el análisis de los sistemas hacen que esta tediosa tarea sea una labor simple. Por lo que se optó por la herramienta computacional Trane Pipe Designer que agiliza el proceso de diseño de tuberías para sistemas distribuidos, determina los tamaños de las tuberías requeridos, encuentra la ruta crítica de la red hidráulica y calcula las caídas de presión a través de válvulas, accesorios o cambios de elevación.

Sus principales características de Trane Pipe Designer:

- Evalúa los sistemas de tuberías.
- Examina sistemas abiertos y cerrados.
- Calcula el rendimiento de la bomba, calcula el NSPH, el consumo energético y sus costes asociados.

En una primera instancia se dan algunas propiedades del fluido con el que se trabajará en la red, seguido de eso, se arma esquemáticamente el sistema hidráulico (reservorios, bomba, codos, conexiones T). El reservorio J1 representa el vaso de agua donde la bomba (J2) efectúa la succión para elevar el flujo de agua hasta el techo y distribuirlo sobre los ramaleos del campo de colectores. Las tuberías P6, P8 Y P10 representan los bancos de colectores y dentro de estas tuberías se dan de alta el tipo de material, la longitud horizontal o vertical y diámetro, para posteriormente registrar los valores de los coeficientes de pérdidas (K_L) de los colectores y válvulas descritas en la sección de accesorios de seguridad y mantenimiento. En la figura 4.10 se observan los accesorios hidráulicos, una vez que se ingresan todos los parámetros y datos de entrada de la red hidráulica, el software PSIM termina calculando la carga total del sistema H_L y el gasto, los cuales son necesarios para seleccionar la bomba de circulación. De acuerdo a los cálculos obtenidos anteriormente en PSIM, las condiciones de operación son:

- Caudal de 15.85 GPM.
- Carga total de 14 ft.
- NPSHa de 37 ft.

Además, se determinó la ruta crítica de la red hidráulica que se localiza en el último arreglo, en la serie número 5. Una vez que PSIM determinó la carga total y el caudal requerido con la ayuda

de una base de datos (Pump-flo) de empresas distribuidoras de bombas, se compararon las opciones y se seleccionó una bomba de la empresa Burks que cumple con las condiciones anteriormente listadas. La bomba es de tipo centrífuga horizontal (base montable), modelo GNA5-1¼ y cuenta con las siguientes características: velocidad de 1,800 rpm, un NPSHr de 3.13 ft y un diámetro de 3.875 in para el impulsor. En la figura 4.13 se visualiza con líneas rojas el punto de operación en la curva de rendimiento donde operaría la bomba, lo que resulta una eficiencia de la bomba de 67.3 %. De manera que se encuentra en una región de operación recomendada por el fabricante. Esta eficiencia puede parecer baja, sin embargo, las bombas centrífugas que operan en condiciones de altas cargas y caudales pequeños, no logran superar el 70 % (Jones et al. 2006).

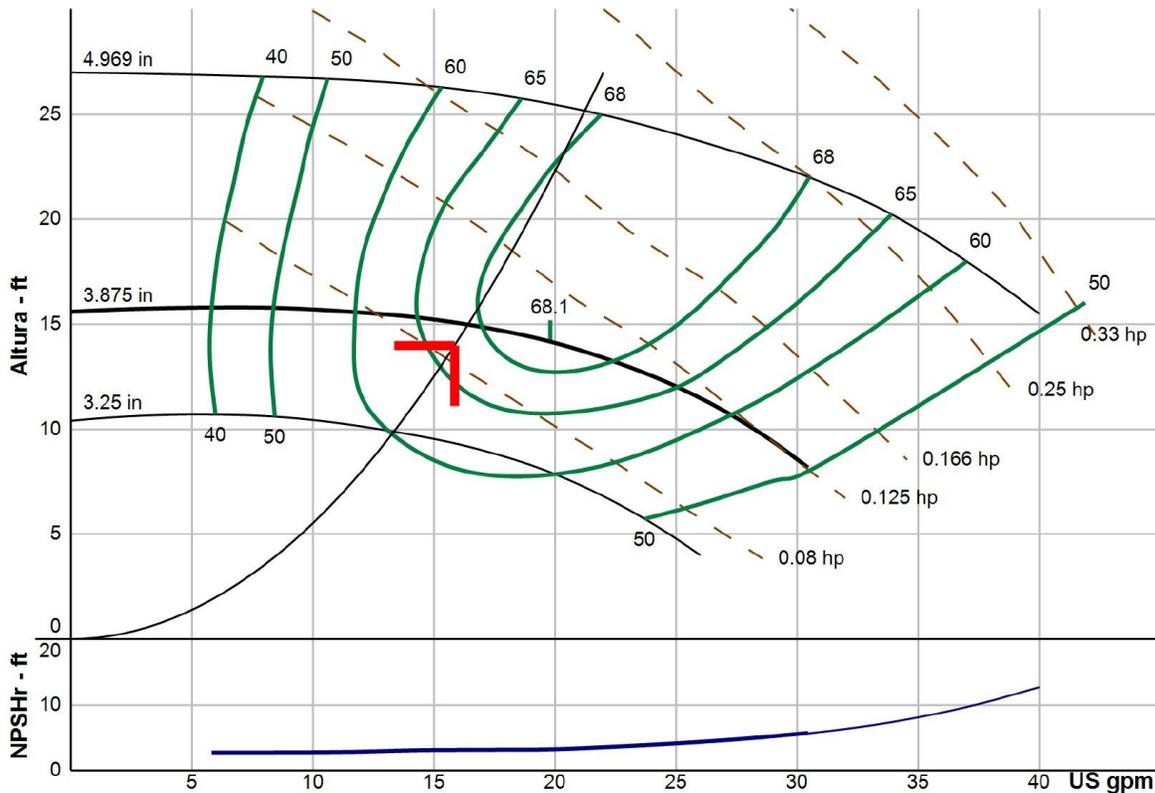


Figura 4.14. Curva de operación de la bomba GNA5-1¼

Capítulo 5

5 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

5.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN TERMOSOLAR-BIOGÁS

Existen varios métodos para la evaluación económica que determinan la rentabilidad de un proyecto, los cuales, permiten contar con bases de comparación que apoyan en la decisión al seleccionar la mejor opción cuando se comparan varios proyectos.

5.1.1 Costo de inversión inicial

Este parámetro influye en cada uno de los indicadores económicos que se utilizaron para este estudio de factibilidad económica. En tabla 5.1 se muestra como está dividido el costo total de la inversión para un campo de colectores de 30 ramaleos conectados en paralelo. Cada ramaleo cuenta con 4 colectores conectados en serie, dando un total de 120 colectores con una aportación solar del 41 %. Dado que se tienen los costos por unidad de cada equipo, se puede determinar los costos de inversión para los campos de colectores con áreas y dimensiones diferentes. Una de las consideraciones que se hicieron para determinar este costo, fue en la sección de instalación hidráulica de los colectores e instalación eléctrica, donde se decidió usar una regla heurística con la finalidad de seleccionar el valor de los costos por instalación, donde el 30 % del costo total de equipos sería el precio de la instalación hidráulica y eléctrica de los colectores. La figura 5.1 muestra la proporción del costo de cada equipo o concepto en la inversión inicial.

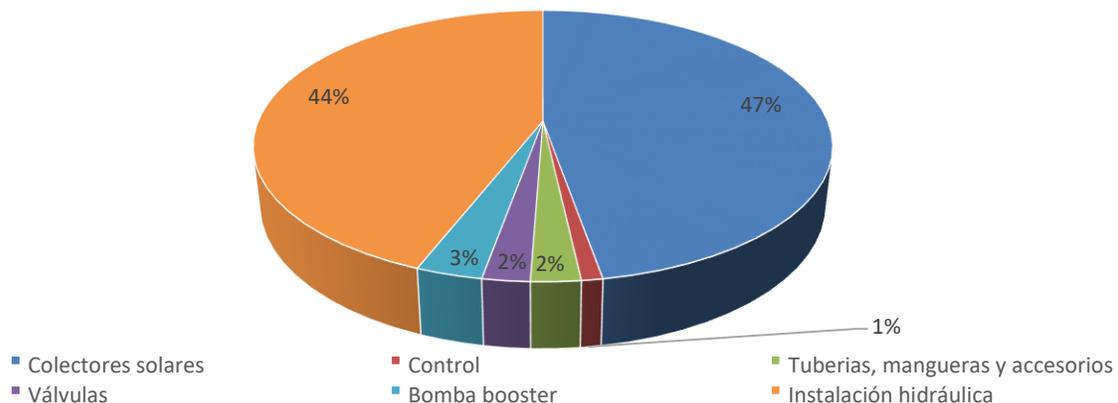


Figura 5.1. Proporción del costo por elemento de la inversión inicial.

Tabla 5.1. Costos para el cálculo de la inversión inicial

Cantidad	Equipos o servicio	P.U.	Importe
120	Colector solar MS 1.9 BLUE	\$7,249.00	\$869,880.00

1	Control diferencial digital modelo CS PLUS con monitoreo del sistema vía web	\$18,333.00	\$18,333.00
34	Kit de mangueras y abrazaderas para interconexión	\$1,119.00	\$38,046.00
30	Inserto de CPVC para conexión de colectores con tubería	\$109.20	\$3,276.00
30	Inserto metálico de acero inoxidable para conexiones de colectores con tubería	\$56.70	\$1,701.00
30	Válvulas eliminadoras de aire	\$380.00	\$11,400.00
30	Válvulas de alivio de presión y temperatura	\$520.00	\$15,600.00
1	Válvula de 3 vías para bypass alberca	\$14,190.00	\$14,190.00
1	Bomba booster para elevar la carga dinámica de bombeo	\$57,654.83	\$57,654.83
Lote	Instalación hidráulica de los colectores e instalación eléctrica de control		\$309,024.25
SUBTOTAL			\$1,339,105.08
IVA			\$107,128.41
TOTAL			\$1,446,233.49

En la tabla 5.2 se observan los costos de inversión inicial para diferentes aportaciones solares, para incrementar dicha aportación se incrementó el área del campo de captación solar. Lo que también incrementa la inversión inicial, por el número de equipos que se requieren, así como la instalación sería mayor.

Tabla 5.2. Costo de inversión inicial

Aportación solar	Inversión para campo de colectores
(%)	MXN
21	\$570,673.81
31	\$1,008,453.65
41	\$1,446,233.49
48	\$1,884,013.32
58	\$2,321,793.16
63	\$2,759,572.99
66	\$3,197,352.83
71	\$3,635,132.67
74	\$4,072,912.50
75	\$4,510,692.34

5.1.2 Costo de operación y mantenimiento

El costo de operación y mantenimiento son principalmente dependientes del tipo y cantidad de combustible que utiliza el sistema. En el caso base donde se cuenta con la caldera utilizan gas LP para el calentamiento de agua de la piscina, se tiene el punto máximo en el costo de

operación y mantenimiento. Sin embargo, entre más nos acercamos al abastecer el 100% de la demanda térmica con el sistema termo solar, se reducen estos costos (ver figura 5.2).

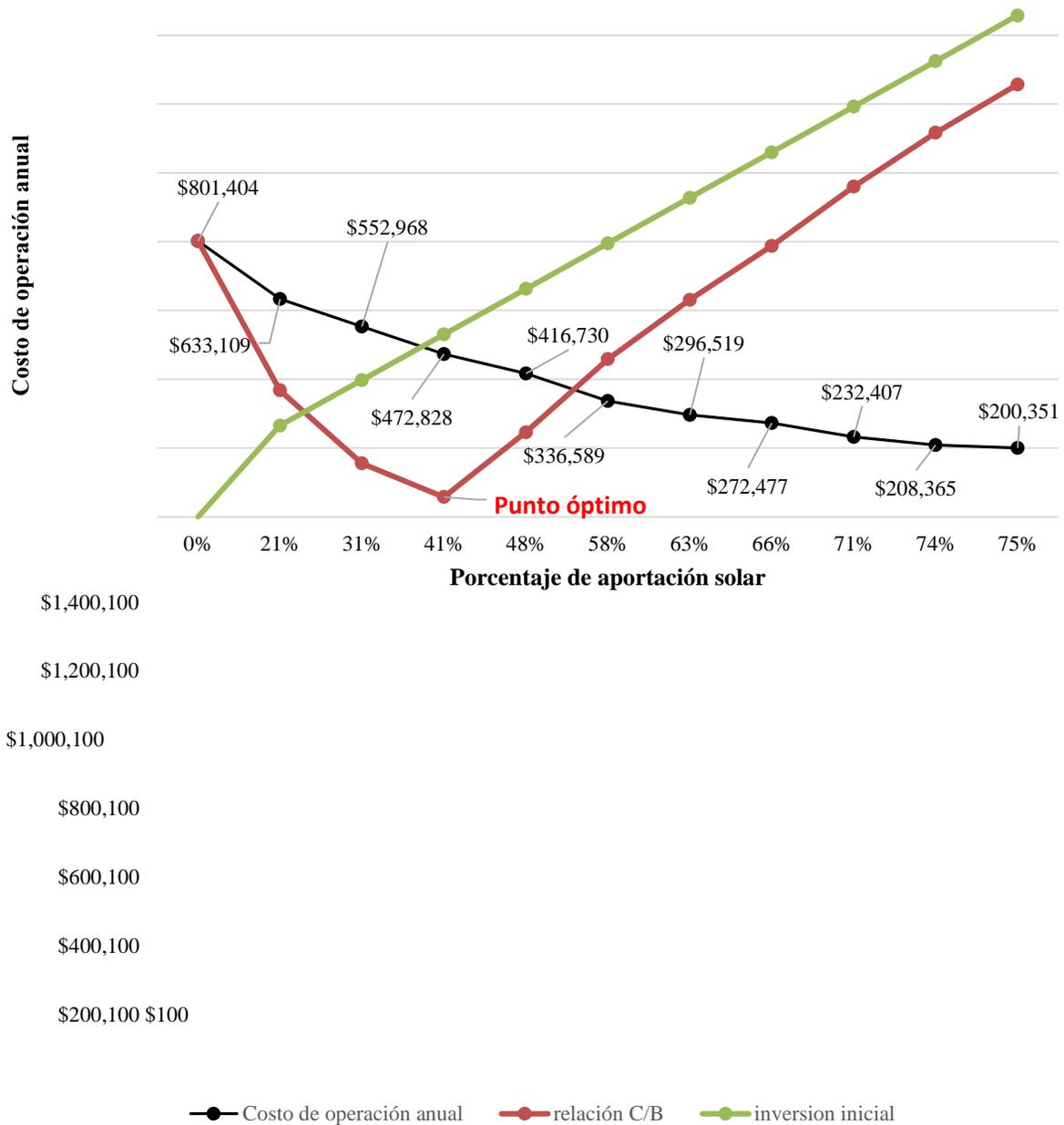


Figura 5.2. Gráfica del costo de operación para las diferentes configuraciones.

5.1.3 Indicadores económicos (TRI, TIR Y VPN)

5.1.3.1 Valor presente neto

Este indicador es indispensable y sirve como uno de los criterios económicos ampliamente utilizados en la evaluación económica de proyectos de inversión, este valor consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo que genera un proyecto y comparar esa equivalencia con el desembolso inicial, con el fin de ver si los ingresos son mayores que los egresos. Por lo que a partir de este indicador, es posible medir en forma sencilla la rentabilidad económica del proyecto.

A partir de que dicha equivalencia es mayor que la inversión inicial; es decir, si este valor es positivo es recomendable que el proyecto sea aceptado. De acuerdo a lo anterior, el VPN de un proyecto estará dado por la ecuación [9].

$$VPN = I_0 + \sum_{t=1}^{Vu} \frac{I_t}{(1+i)^t} \quad [9]$$

donde:

I_0 Inversión inicial

I_t Flujo de efectivo de gastos implicados en el periodo t

Vu Periodo de vida útil

i tasa de inflación

5.1.3.2 Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno (TIR) o también conocida como tasa interna de rendimiento, es un indicador financiero que mide el rendimiento de los fondos que se pretenden invertir en un proyecto, volviéndose en un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. El TIR está definido como la tasa de interés que vuelve cero el valor actual o presente, el valor futuro equivalente a una serie de ingresos y salidas. Por lo cual, la tasa interna de retorno permite conocer el rendimiento real de una inversión. La tasa interna de rendimiento representa en términos económicos el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en cualquier punto del tiempo de la vida de un proyecto. El proyecto será rentable si la TIR es mayor o por lo menos igual a la tasa de rendimiento mínima atractiva.

El cálculo de la TIR requiere por lo general, una solución iterativa o prueba y error, y se obtiene a partir de la ecuación anterior al igualarla a cero.

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^{Vu} \frac{I_t}{(1+i)^t} = 0$$

5.1.3.3 Tiempo de recuperación de la inversión

Este indicador describe cual es el tiempo necesario para que los beneficios netos de un proyecto amorticen el capital invertido. Su primordial utilidad es conocer en qué tiempo una inversión genera los recursos suficientes para igualar el monto de la inversión inicial.

$$TRI = \frac{\log \left[\frac{I_0}{B_a} \frac{i}{100} + 1 \right]}{\log \left[1 + \frac{i}{100} \right]} \quad [10]$$

donde:

I_0 Inversión inicial

B_a Beneficio promedio anual generado por el proyecto

i Tasa de inflación

Los resultados financieros reflejan el nivel de rentabilidad del proyecto como se puede apreciar en la figura 5.3. donde se observa los resultados del VPN y TRI a partir de las simulaciones, se calcularon los costos de operación y mantenimiento del caso base (caldera con gas L.P.). Y en las simulaciones de las configuraciones con diferentes contribuciones de fracción solar, nos permite cuantificar los ahorros, el tamaño del sistema y las cantidades de equipos para determinar la inversión inicial.

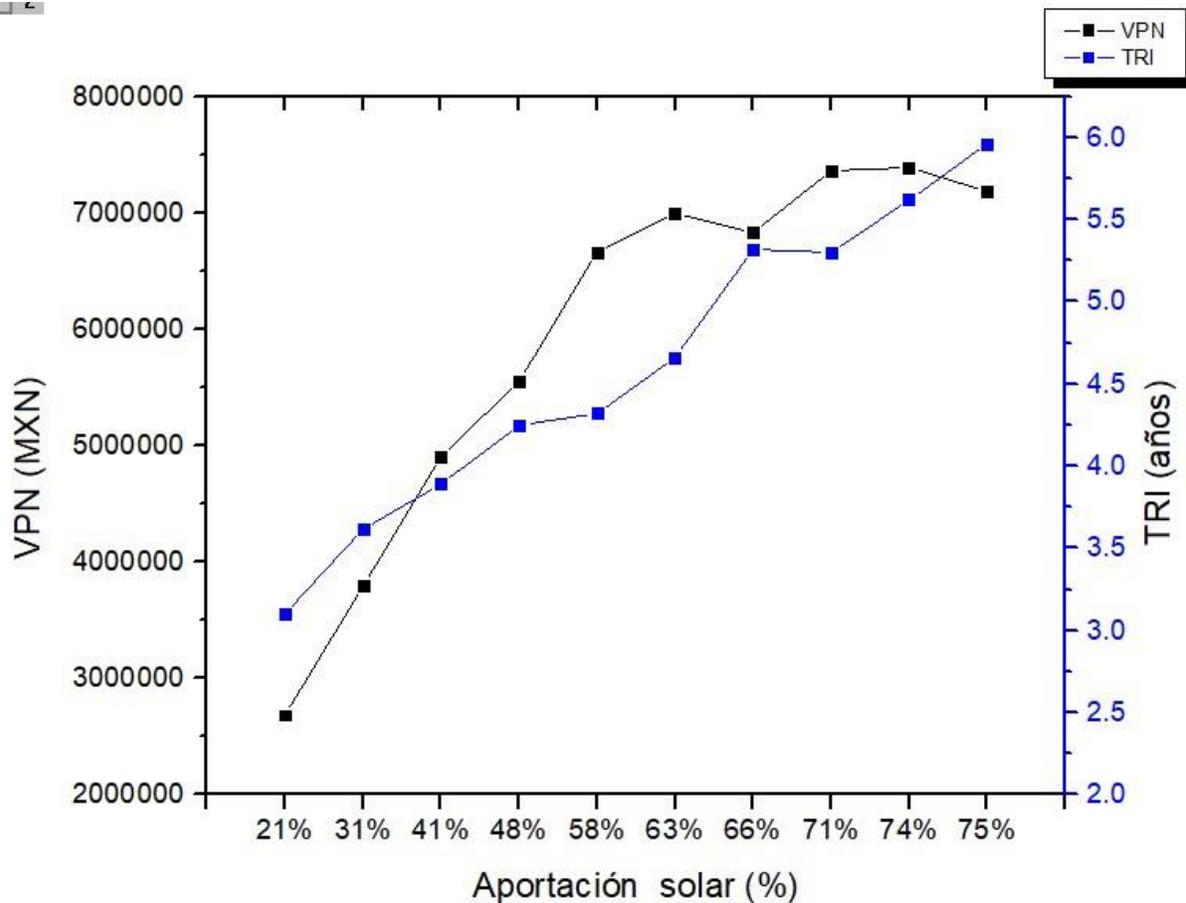


Figura 5.3. Comportamiento de los indicadores estadísticos (VPN y TRI).

Capítulo 6

6 ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN

6.1 PUESTA EN MARCHA

En esta sección se discuten los resultados de las simulaciones de la dinámica térmica que se presenta al momento de poner en marcha el sistema de calefacción. Es decir, al verter agua de la red (Temperatura del agua de la red = 15.5 °C) para el llenado y llegar al punto de temperatura de consigna (24°C), a través del sistema de calefacción (Híbrido solar-biogás). En la figura 6.1 se observa el incremento en la temperatura de la piscina (T_p) que sobre pasa los 22° C, durante las primeras 24 horas. Dicho incremento en la temperatura es ocasionado principalmente por la adición de calor de la caldera. Debido a los niveles de radiación que se encuentran en un rango

de 250-500 W/m², vuelven adversas las condiciones para la generación de energía térmica en el campo de colectores solares. Volviéndose fundamental la contribución por parte de la caldera para alcanzar en el primer día una temperatura superior a los 22 °C.

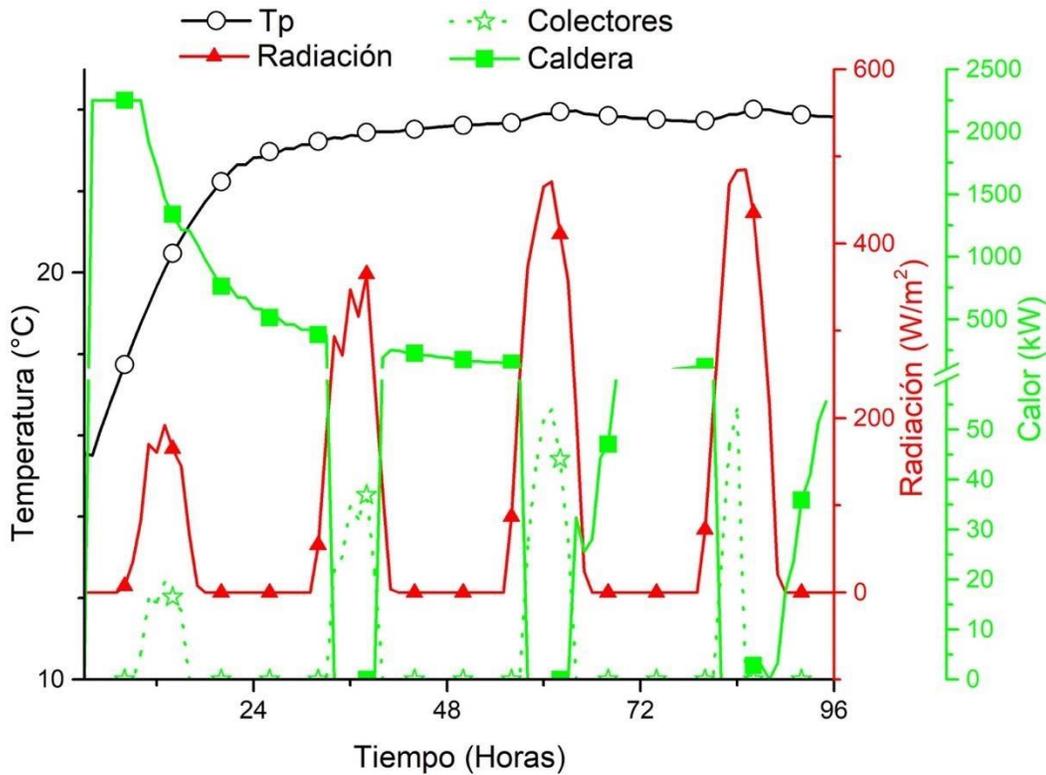


Figura 6.1. Dinámicas en el modo de operación puesta en marcha.

6.2 MODO HIBRIDO

Una vez que se tenga estabilizado el modo puesta en marcha, logrando mantener la temperatura de consigna. El modo híbrido trabajará durante los meses enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre, con el objetivo de cubrir la demanda de energía térmica. Las dinámicas de generación de energía y pérdidas de calor se ven severamente afectadas por variables climatológicas, de manera que se vuelve de sumo interés cuales son las que afectan más al comportamiento del sistema. Por lo que, el requerimiento de energía en los meses con temperaturas más frías, sin humedad y velocidades de viento altas, propician mayores pérdidas de calor. Como lo son el caso de enero, febrero y diciembre, mientras que la generación de energía por parte de los colectores solares, se influenciada principalmente por la radiación global que incide en el campo de colectores. En la figura 6.2 se visualiza el comportamiento de las pérdidas de calor (convección y evaporación) durante la semana crítica del mes de enero. La semana crítica se define como la semana con mayores pérdidas de calor. En la tendencia de

las pérdidas por convección (Q_{cv}), se observa que sus puntos máximos se ven influenciados por la variable de la temperatura ambiente, ya que la fuerza motriz es generada por la diferencia de temperatura entre la piscina y la del ambiente ($T_p - T_a$). Incluso se puede observar una inclinación en la temperatura ambiente a tener un incremento gradual, causando una disminución en las pérdidas por convección. En las primeras 24 horas se tuvo el punto máximo de $Q_{cv,max} = 18$ kW, mientras que en el último día se tiene el punto mínimo $Q_{cv,min} = 1$ kW. En caso de las pérdidas por evaporación el comportamiento es inverso al de la humedad, como se puede visualizar en el último día evaluado, las pérdidas por evaporación lograron un pico de 22 kW y la humedad se encontraba en un mínimo del 30 % con velocidades de viento de 9 m/s, lo que propicia aún más el fenómeno evaporativo. El rango de valores en las pérdidas por evaporación fue de 22 – 10 kW, lo que muestra que estas pérdidas se mantienen más estables en comparación con las de convección que tuvo un comportamiento con mayor variabilidad. Por otro lado, en la gráfica se logra visualizar que a medida que aumenta la temperatura ambiente, el aire se vuelve más seco, es decir, la humedad relativa disminuye y al disminuir la temperatura, el aire se vuelve más húmedo.

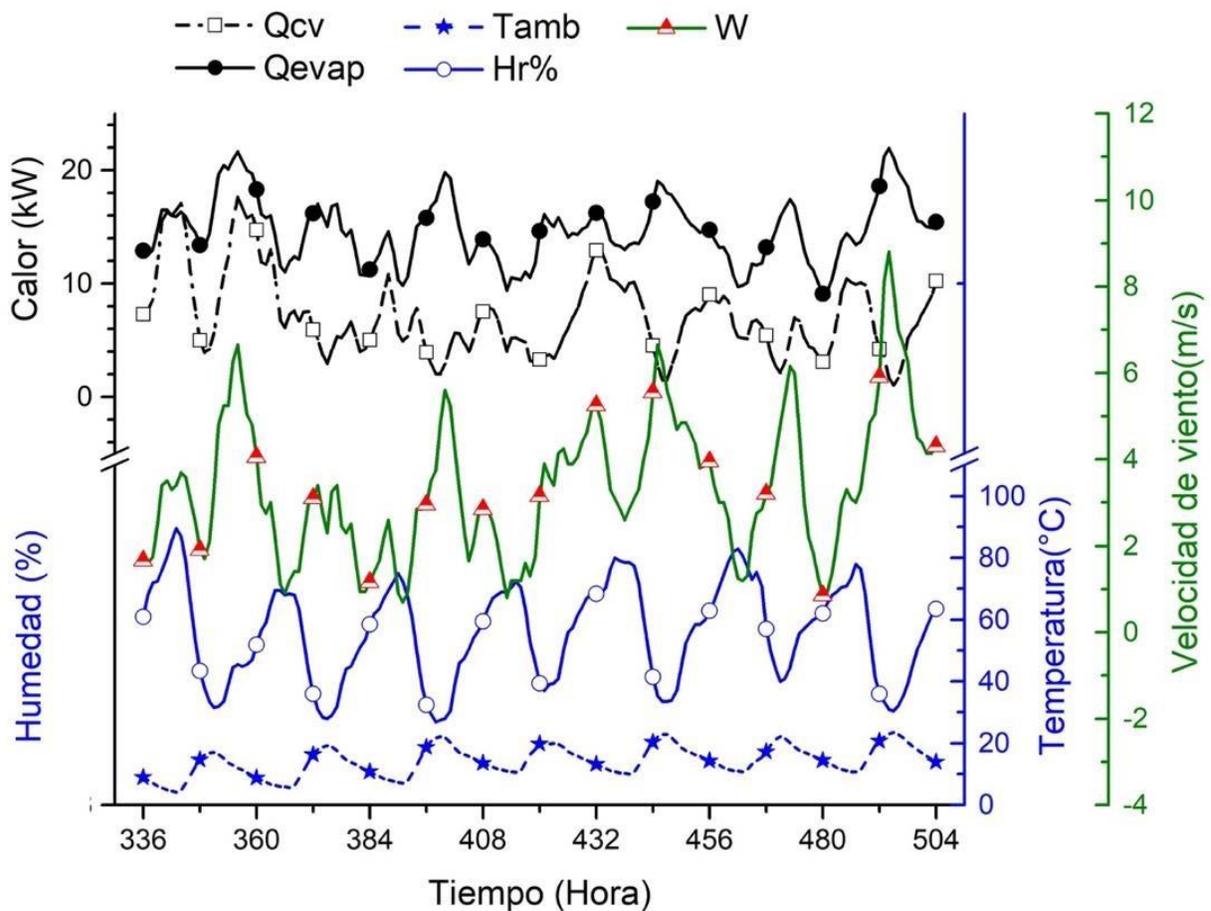


Figura 6.2. Comportamiento de la semana crítica de enero.

La generación de calor por parte de la caldera y el campo de colectores durante la semana crítica de enero se observa en la figura 6.3, donde los niveles de radiación máximos fueron de $600 - 400 \text{ W/m}^2$ lo que desfavoreció la generación de calor por parte de los colectores solares. Incluso en el cuarto y séptimo día se observan algunas condiciones inestables por nubosidades, provocando perturbaciones en la tendencia de esta variable. Mientras que la caldera se ve comprometida a contribuir, en algunos momentos el doble de energía térmica que el campo de colectores. En el segundo día, la temperatura ambiente fue de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ al medio día (12 p.m.) y la generación termosolar aportó 60 kW , al día siguiente alcanzó su punto máximo alrededor de los 80 kW . La propensión que sigue la temperatura ambiente es de un incremento gradual, iniciando con temperaturas máximas de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el primer día logrando superar los $22 \text{ }^\circ\text{C}$ en el último día de la semana.

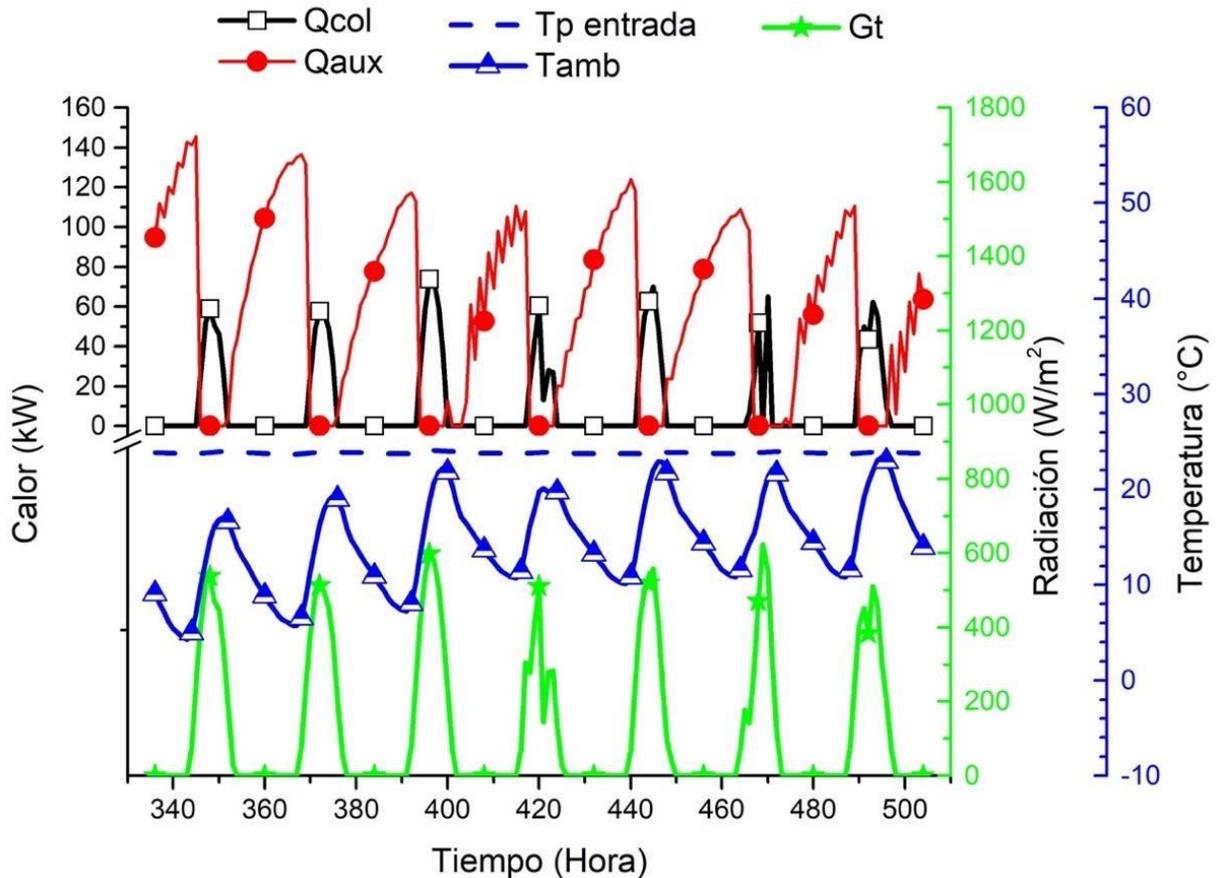


Figura 6.3. Generación de calor en la semana crítica de enero.

En la figura 6.4 se observan las principales pérdidas (Q_{cv} Q_{evap}) de calor durante una semana de febrero, así como las variables que afectan las magnitudes de estas pérdidas. Cabe destacar que, en febrero, las velocidades de viento y los decrementos en la humedad logran que se mantengan las pérdidas de calor por evaporación (Q_{evap}) entre los 10 y 20 kW, muy similar a lo que se presentó en el mes de enero. Por otro lado, las pérdidas de calor por convección sufren un decaimiento gradual ocasionada por el incremento en la temperatura ambiente. En el transcurso del primer día, las pérdidas por convección sobrepasaron los 28 kW, mientras que el último día el valor máximo fue de 8 kW. Incluso en algunos casos sobrepasa la temperatura de consigna, generando una aportación de calor debido a que la dirección del flujo de calor cambia, es decir, las pérdidas se vuelven ganancias de calor, ya que el ambiente tiene mayor temperatura que la piscina. por otro lado, los datos registrados de la humedad relativa se encuentran en magnitudes que van del 20 al 95%.

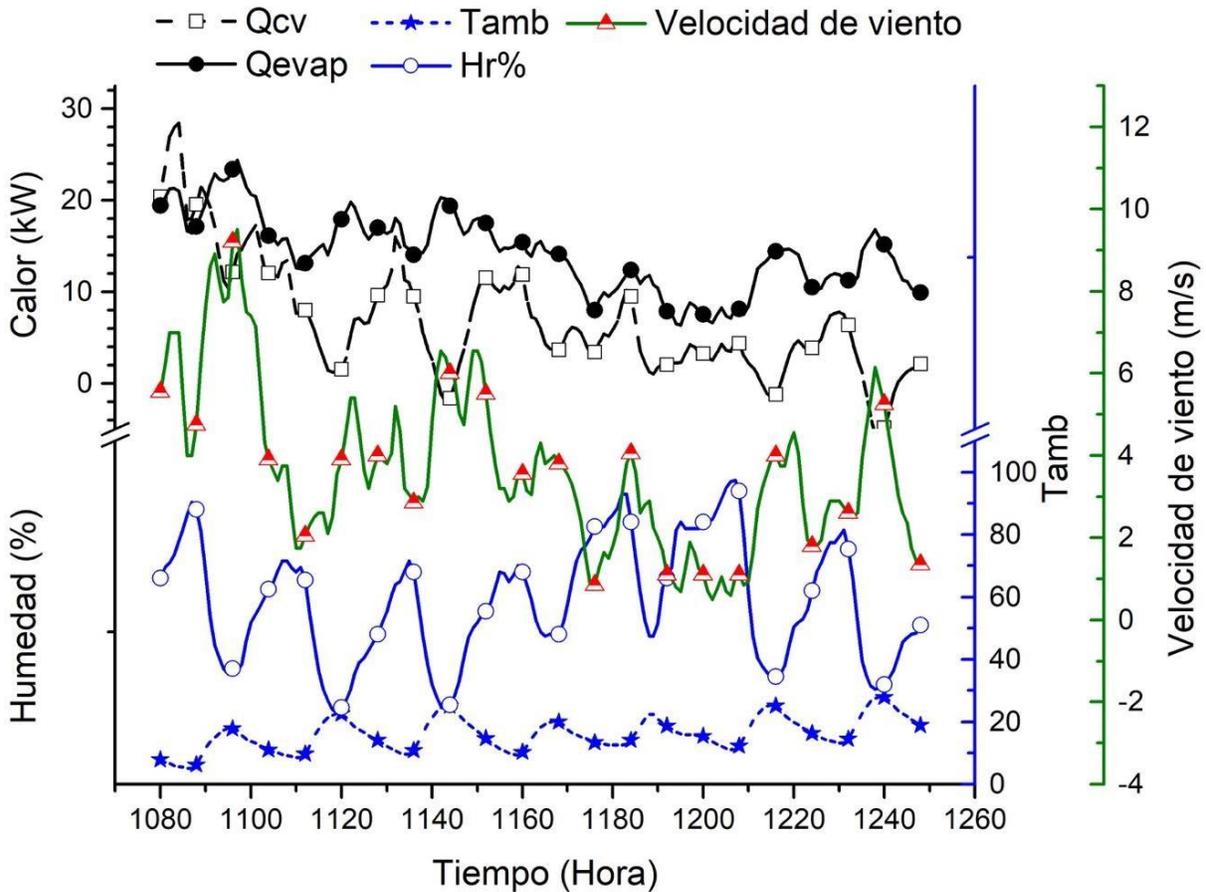


Figura 6.4. Pérdidas de calor (Q_{cv} y Q_{evap}) en la semana crítica de febrero.

Los resultados que se visualizan en la figura 6.5 representan la producción de energía térmica del sistema de calefacción híbrido en una semana de febrero. Las condiciones ambientales como radiación y temperatura ambiente afectan el comportamiento principalmente del campo de colectores. Durante la semana de febrero la generación termosolar logro un pico de 100 kW y los niveles de radiación superaban los 550 W/m². El calor generado por la caldera (Q_{cal}) muestra una tendencia de decremento progresivo, ocasionada por la reducción en la demanda de calefacción en comparación con los meses de enero y diciembre. Cabe resaltar que en el último día no hubo una aportación de calor por parte de la caldera y la temperatura ambiente después de mediodía supero los 24 °C, sin embargo, la humedad alcanzo su valor mínimo en el día ($Hr = 30\%$) acompañado de ráfagas de viento de 6 m/s, catalizando las pérdidas de calor por evaporación.

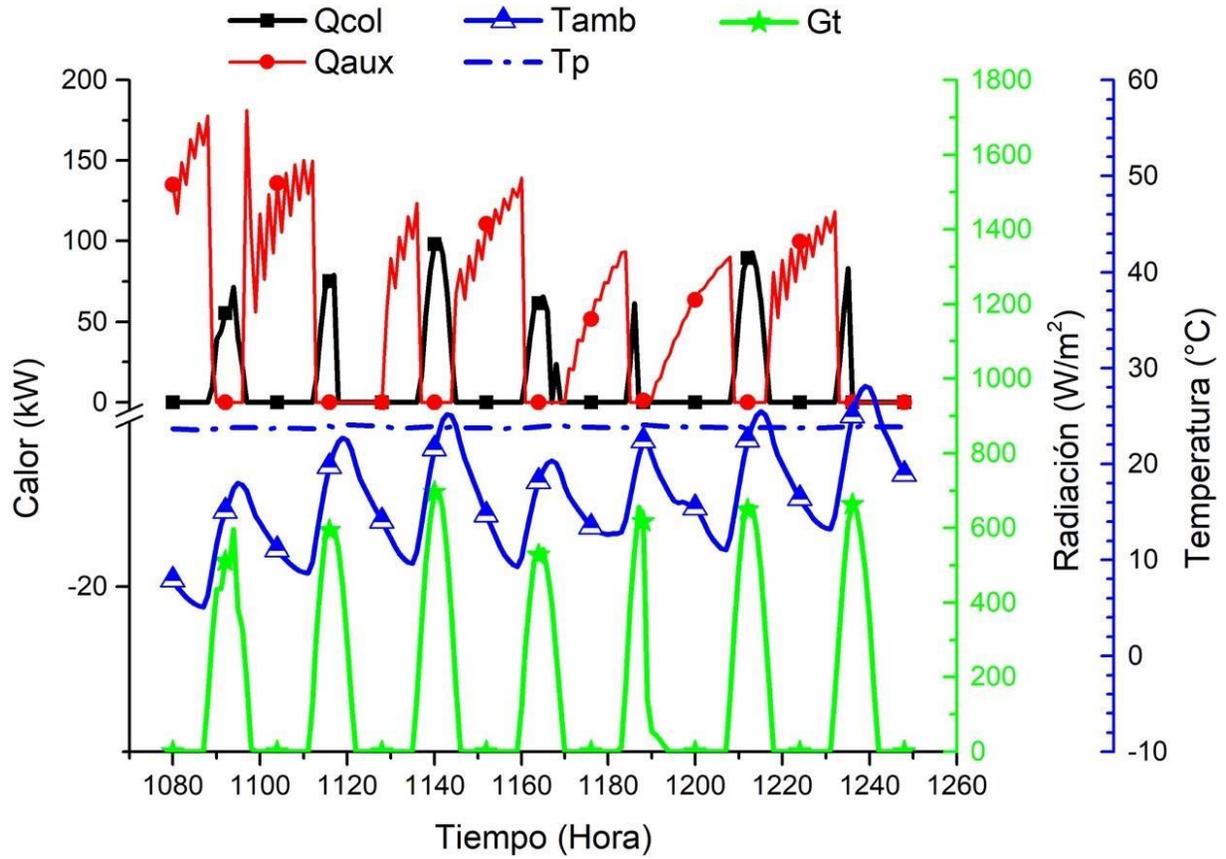


Figura 6.5. Generación de calor en la semana crítica de febrero.

Evaluar el comportamiento de las pérdidas de calor en una semana de diciembre también se vuelve relevante. Debido a que en este mes se registran condiciones ambientales desfavorables para un sistema de calefacción en una piscina al exterior, tal como se muestra en la figura 6.6. En el mes de diciembre las pérdidas de calor por evaporación son las de mayor magnitud, teniendo un pico aproximadamente de 20 kW térmicos, donde la temperatura ambiente rondaba en los 20 °C. Cabe resaltar que no fue la temperatura mínima del día. Sin embargo, la velocidad de viento alcanzó los 8 m/s y una humedad del 30 %, generando una diferencia del porcentaje de agua que hay en el aire del ambiente y el espejo de agua. Haciendo resaltar que la variable de humedad cataliza las pérdidas de evaporación por encima que el parámetro de temperatura ambiente. La velocidad de viento es una variable que afecta a estas dos pérdidas de calor, incluso se logra ver que estas pérdidas siguen el comportamiento de este variable.

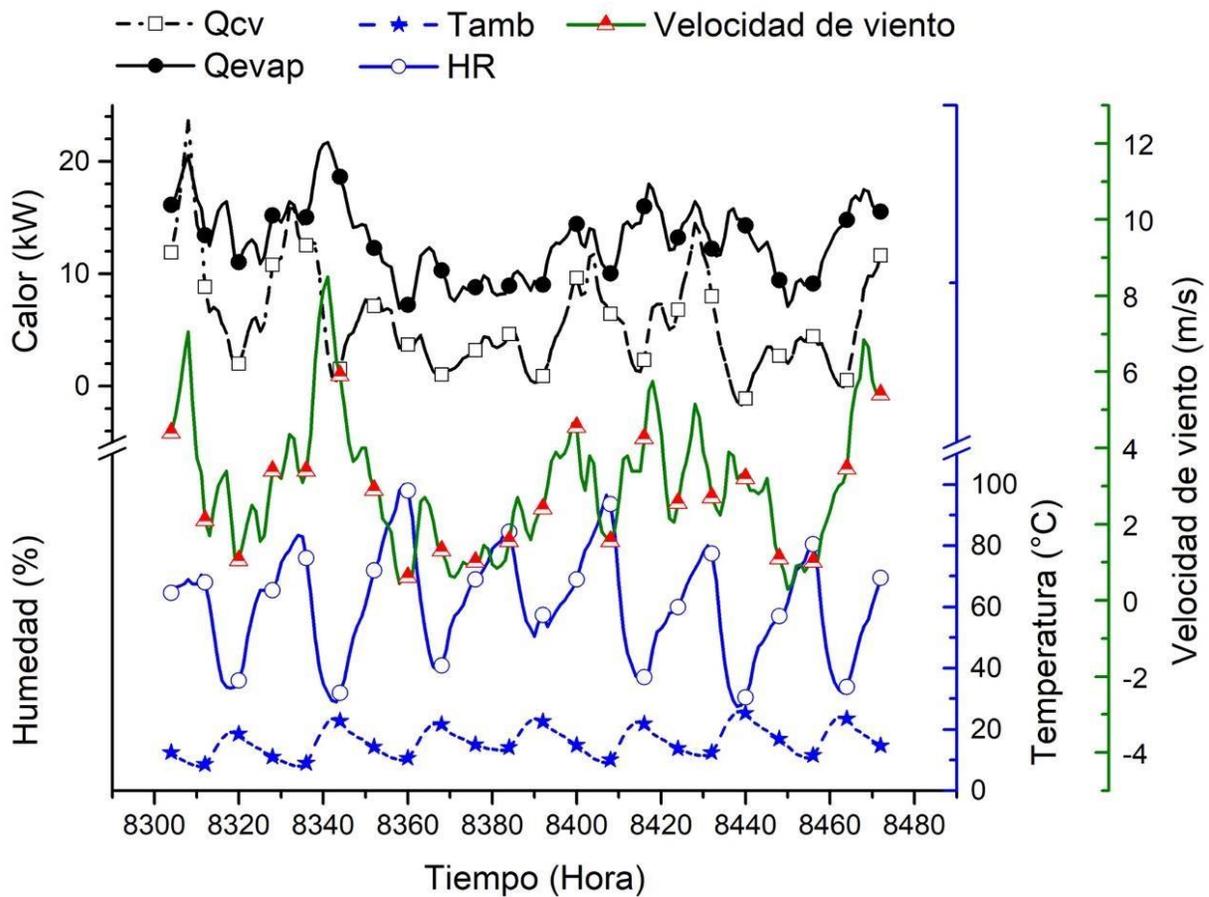


Figura 6.2. Comportamiento de las pérdidas de calor y variables climatológicas en la semana crítica de diciembre.

Como se logra visualizar en la figura 6.7, la cual describe de manera gráfica el comportamiento del sistema de calefacción durante una semana de diciembre. Por un lado, la generación termosolar en el mes de diciembre también fue afectada por las condiciones de radiación, ya que no fueron favorables, registrando magnitudes de 400-600 W/m² en los picos de radiación. La ganancia de calor por parte del sistema termosolar logro tener un pico en el sexto día de 80 kW. Mientras que la generación de calor con la caldera (Qaux), tuvo altos requerimientos para cubrir la demanda térmica logrando alcanzar picos máximos de 90-130 kW. Las temperaturas mínimas registradas en estos días fueron de 8 °C a los 12 °C, por su contra parte, las temperaturas máximas rondaron en los valores de 19 a 26 °C.

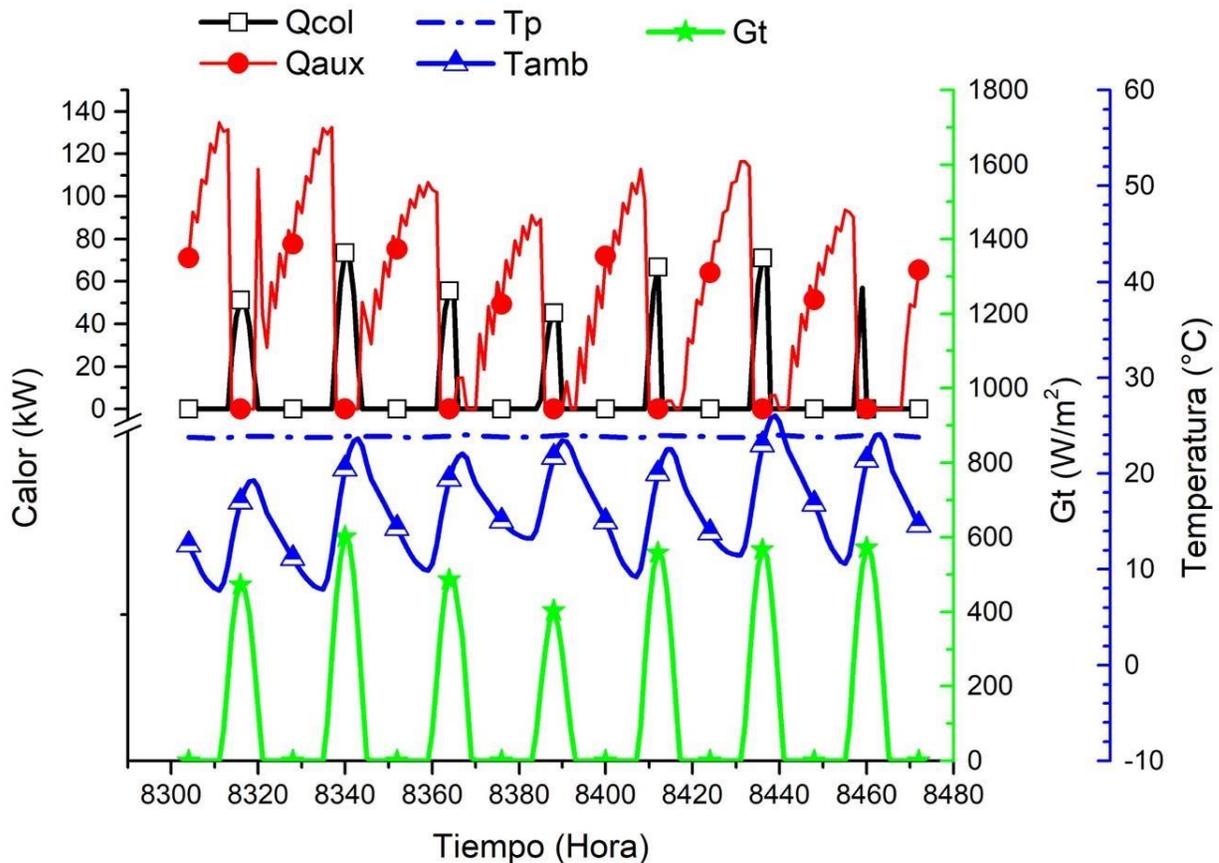


Figura 6.7 Generación de energía térmica del sistema de calefacción en una semana de diciembre.

6.3 MODO SOLAR TÉRMICO

En el modo donde el sistema de climatización de la piscina solo depende de la adición de calor proveniente del campo de colectores. Los meses en los que es posible cubrir la demanda térmica al 100 % son abril y octubre, debido a que la demanda disminuye y se cuenta con un alto potencial energía solar. En la figura 6.8 se observan dos pérdidas de calor (Q_{cv} y Q_{evap}), donde las pérdidas por evaporación resultaron ser las más significativas. Debido a que los porcentajes de humedad sufren un descenso gradual hasta llegar a su punto mínimo de 20 %, aproximadamente a las 12 del mediodía. Este comportamiento se ve repetitivo en cada uno de los días. La velocidad de viento por su parte en ningún momento excede el valor de los 6 m/s.

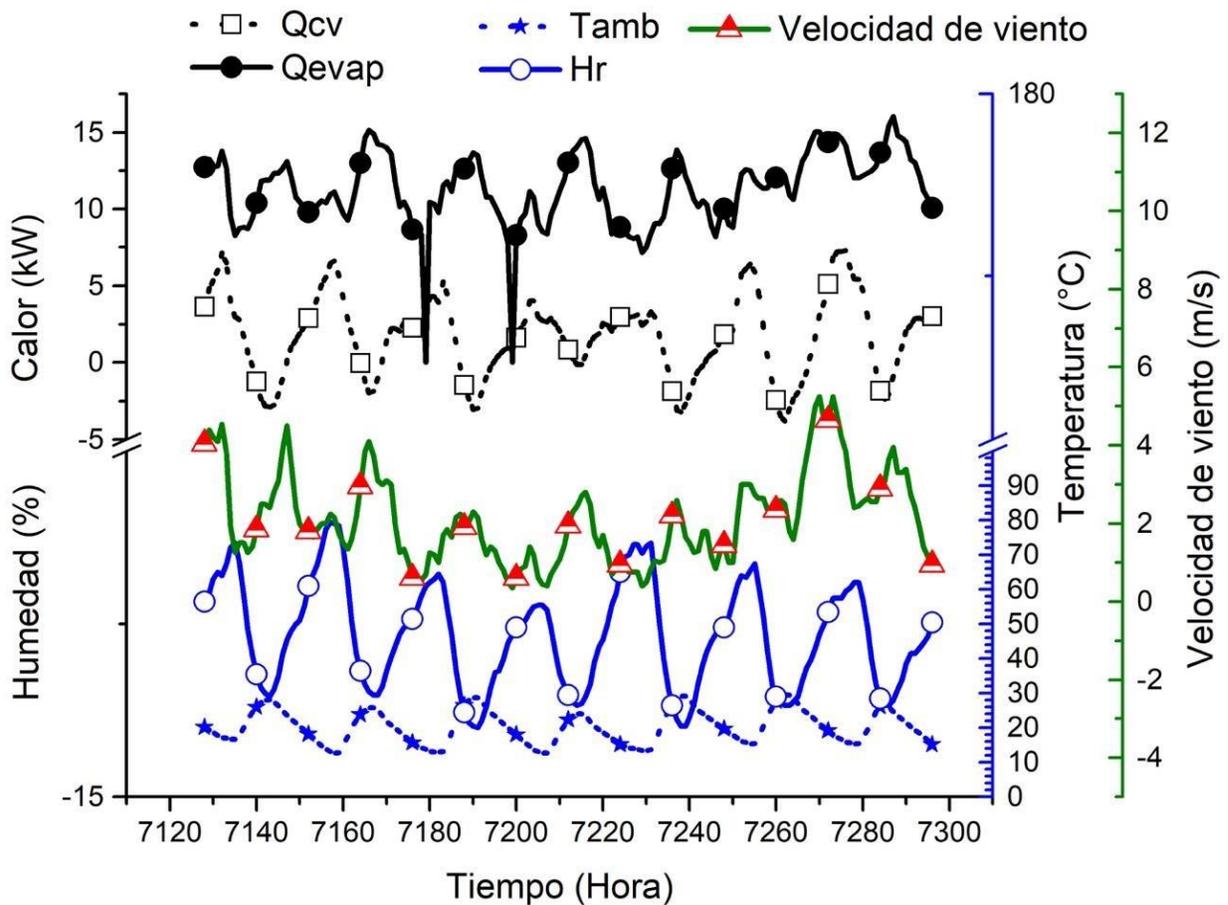


Figura 6.8 Pérdidas de calor (Q_{cv} y Q_{evap}) en la piscina en la semana de octubre.

La contribución de calor por parte del campo de colectores es durante 10 horas al día por lo que tiene que adicionar el calor necesario para mantener la temperatura de consigna ($24\text{ }^{\circ}\text{C}$) en el vaso de agua. En la figura 6.9 se visualiza, el primer día la generación de energía térmica del campo de colectores en el punto máximo fue de 80 kW . En el segundo día el pico de generación termosolar superó los 100 kW estos puntos máximos se mantuvieron en las mismas magnitudes durante los días posteriores. Por otra parte, los niveles de radiación mantuvieron un comportamiento muy similar que muestra días despejados y puntos máximos superiores a los 600 W/m^2 .

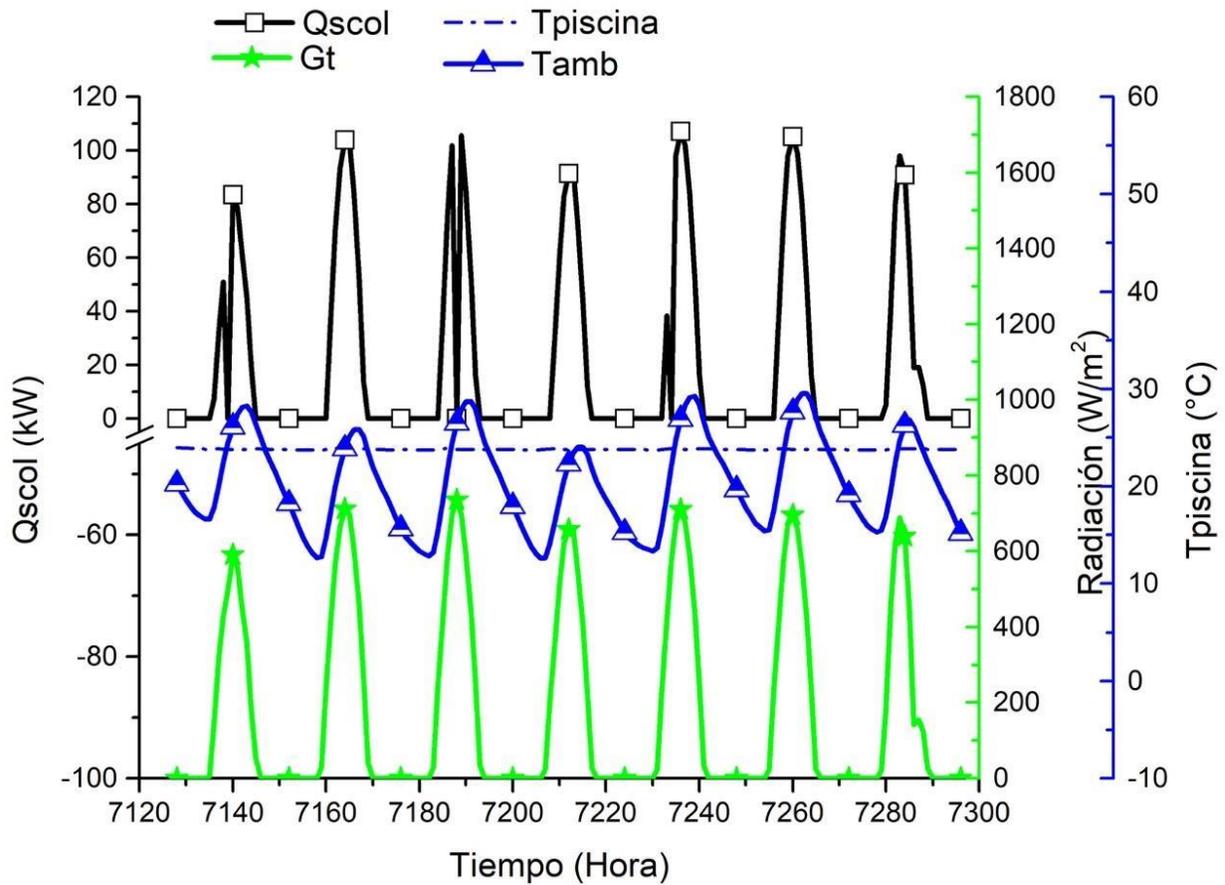


Figura 6.9 Contribución de energía térmica del campo de colectores en una semana de octubre.

6.4 MODO INACTIVO

La demanda energética térmica para un sistema de calefacción en una piscina como la del complejo acuático, muestra un valle en la temporada de verano, ocasionado por las condiciones ambientales como los niveles de radiación y temperatura ambiente que supera la de consigna. A partir del mes de mayo la temperatura de la piscina supera la temperatura de 24 $^{\circ}C$, lo que origina una ganancia de calor del ambiente hacia el cuerpo de agua de la piscina, incrementando su temperatura de manera natural. Por lo tanto, el sistema de calefacción no se requiere en el periodo de verano, esta temporada está marcada por la zona marcada en la gráfica 6.10. que describe el comportamiento de la temperatura de la piscina.

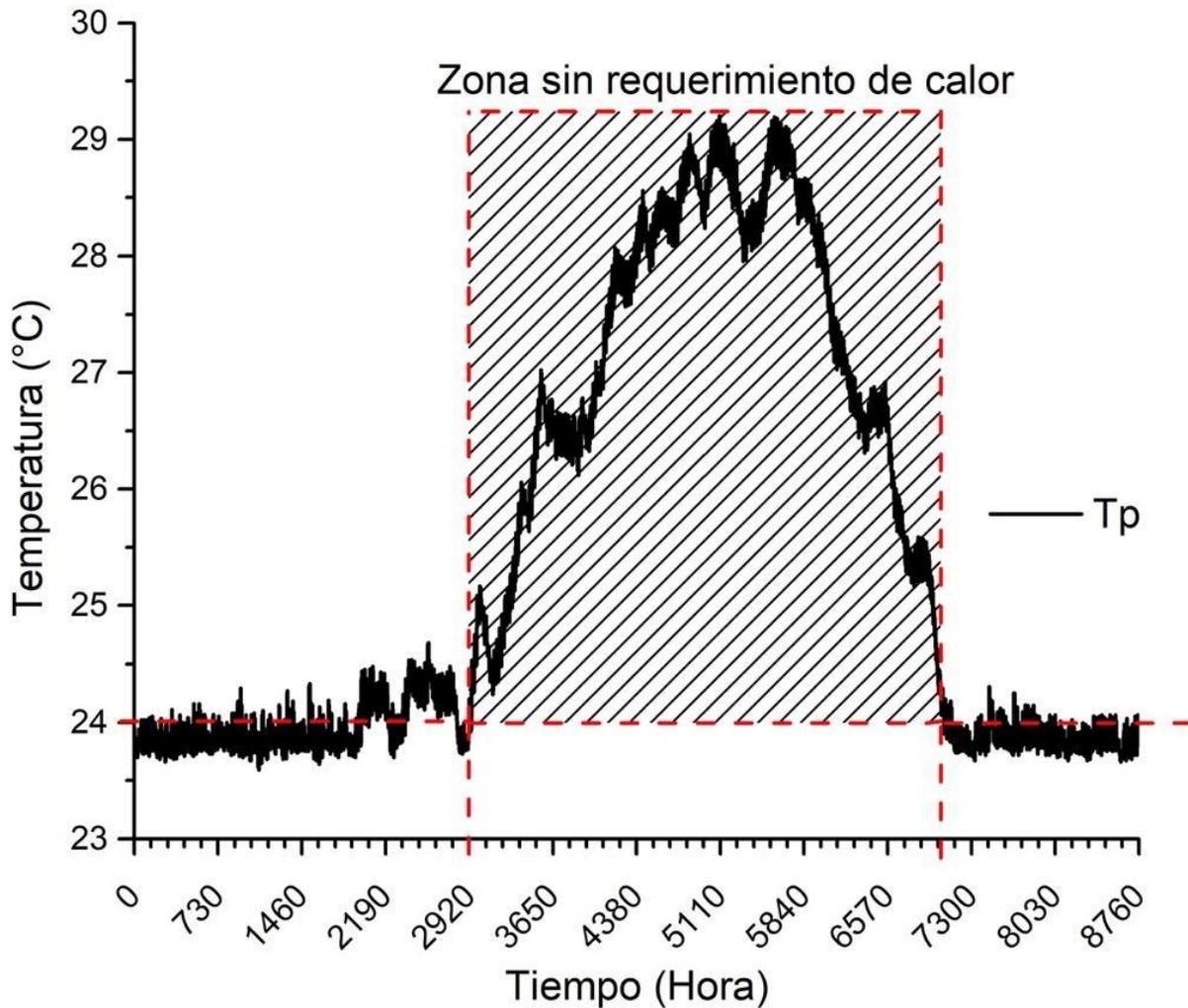


Figura 6.10 Comportamiento térmico de la piscina durante el año.

La inactividad de los sistemas de calefacción termosolares durante los meses de verano es un desafío común debido a la disminución de la demanda de calefacción en climas cálidos. Tiene afectaciones negativas desde el punto de vista económico, debido a que los ahorros en los costos de operación son menores por el periodo de uso. Es decir, se cuenta con un campo de colectores y unas condiciones ambientales que potencializan la generación termosolar, sin embargo, no son aprovechadas. Por lo tanto, se vuelve necesario redirigir esta energía térmica a otra aplicación, con la intención de mantener activa la infraestructura y aumentar la utilidad económica de la instalación. y así mejorar los indicadores económicos como el tiempo de retorno de la inversión.

Capítulo 7

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

El modelo matemático que se desarrolló para el análisis de transferencia de calor en la piscina, proyecta un comportamiento representativo de los fenómenos térmicos que se dan con las variables ambientales, proporcionando confiabilidad a los cálculos de la demanda térmica para el calentamiento.

El análisis térmico del cuerpo de agua de la piscina con el ambiente, corroboró que los periodos de tiempo donde se requiere calefacción son a partir de enero y finaliza en abril, la segunda temporada del año es de septiembre a diciembre, siendo este último mes el que mayor demanda térmica necesita, sin embargo, en febrero se encuentra el día más crítico para el sistema de climatización. Mientras que el recurso solar tiene mayor potencial en los meses de mayo a julio. En cuanto al estudio del comportamiento térmico del sistema de calefacción con caldera, mostró que el mes con mayor requerimiento de energía térmica es diciembre. Sin embargo, la variabilidad en el precio del gas hace que los costos de operación a facturar en el mes de enero sean mayores que los de diciembre, ya que el precio del gas tuvo un incremento en los primeros meses del año del 2022.

La simulación operativa del sistema termosolar, muestra que la intermitencia de la energía solar vuelve difícil la tarea de lograr un sistema de calefacción que funcione en su totalidad con energía termosolar. Por lo que se tendría que sacrificar el confort por algunos días, además que se necesita un área de captación muy amplia para el espacio disponible en el techo de lámina con el que cuenta el complejo acuático.

Por otra parte, el sistema híbrido de 30 ramaleos muestra un tiempo de recuperación de 3 años y cumple con los requerimientos de la NADF-008-AMBT-2017, que establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en instalaciones y solicita que para un edificio con las características del complejo acuático, le corresponde el 40 % de aportación solar de la demanda térmica total que necesita el edificio.

7.2 RECOMENDACIONES

La inactividad de los sistemas de calefacción termosolar durante los meses de verano es un desafío común debido a la disminución de la demanda térmica, sin dejar a un lado, que es cuando mayor recurso solar hay en la zona. Para abordar la problemática de inactividad del sistema termosolar durante los meses de verano y aprovechar al máximo la infraestructura existente, se pueden considerar las siguientes recomendaciones:

- Control inteligente y predictivo: Los sistemas termosolares también pueden equiparse con sistemas de control inteligentes que ajusten la operación de acuerdo con las condiciones climáticas y la demanda térmica. Esto puede ayudar a evitar el sobrecalentamiento y garantizar un uso eficiente de la energía solar disponible. El control predictivo podría jugar un papel importante en la configuración termosolar, para proyectar los momentos en que se perdería el confort térmico y aumentar un grado Celsius la temperatura de consigna para tener mayor inercia térmica y, por lo tanto, mayor tiempo en la zona de confort térmico.
- Integración con sistemas de aire acondicionado: Una de las propuestas de solución que tiene mayor potencial son los sistemas de refrigeración termosolar, debido a que se complementa con la temporada de inactividad de los sistemas de calefacción. Esto permite un uso continuo del campo de colectores durante los meses de verano. Ya que el comportamiento de la demanda de enfriamiento muestra una tendencia inversa a la de calefacción. Las tecnologías que podrían ser utilizados son los sistemas de adsorción o desecación solar, ya que los niveles de temperatura requeridos (temperatura de activación) podrían ser producidos por los colectores de placa plana.
- Almacenamiento térmico estacional: Una solución efectiva es la implementación de sistemas de almacenamiento térmico a largo plazo que permitan acumular el exceso de calor producido durante la temporada de verano. Con la finalidad de darle uso en los meses invierno. Esto puede lograrse mediante el uso de materiales de cambio de fase o tanques de almacenamiento enterrados. Estos últimos utilizan como ventaja las pequeñas variaciones de temperatura en el subsuelo, lo que reduce las pérdidas de calor con el ambiente.

- Aplicaciones de calor adicionales: Además de la calefacción de la piscina, se pueden utilizar los sistemas termosolares para proporcionar agua caliente sanitaria a edificios colindantes. Por ejemplo, el hospital veterinario que requiere de agua caliente sanitario para actividades, tales como: Lavandería, limpieza y esterilización de equipo.
- El secado solar de lodos activos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UABC surge como una posible solución para aprovechar el calor generado por el sistema termosolar.

La elección de la solución dependerá de factores como: la ubicación geográfica, la demanda local de calor, el presupuesto y las metas de sostenibilidad. En general, la combinación de varias de estas estrategias puede ayudar a mantener activo el campo de colectores durante todo el año y aumentar la utilidad económica de la instalación. Se recomienda analizar más a detalle la influencia del costo de biogás para realizar un análisis económico detallado, que

REFERENCIAS

Abdel-Khalik SI (1976). Heat removal factor for a flat-plate solar collector with a serpentine tube. *Solar Energy*, 18: 59–64.

Armijo, C., Ojeda-Benítez, S., & Ramírez-Barreto, E., (2008). Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste management*, 28, S21-S26.

Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., & Bajwa, S. G. (2018). A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 296-305.

Bangar, P. S., Jain, S., & Panwar, N. L. (2021). Development of an analytical model for cost-based optimization of KVIC biogas plant dimensions. *Bioresource Technology Reports*, 16, 100879.

Buonomano A, de Luca G, Figaj RD, Vanoli L (2015). Dynamic simulation and thermoeconomic analysis of a PhotoVoltaic/ Thermal collector heating system for an indoor–outdoor swimming pool. *Energy Conversion and Management*, 99: 176–192.

Brook F (1955). *Solar Energy Research*. Daniels F, Duffie JA (eds). Madison: University of Wisconsin Press.

Comité Técnico del Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales. "EC0207." *Diario Oficial de la Federación*, mayo 24, 2012.

CONUEE (2023). Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Lista de combustibles, sus poderes caloríficos y equivalencia en términos de barriles de petróleo crudo.

Disponible en:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/809207/lista_combustibles_y_sus_poderes_calorificos_2023.pdf

Cengel, Y. A. (2000). *Heat and mass transfer*. MCGRAW-HILL.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* / (7a. ed.) MCGRAW-HILL.

Cunio LN, Sproul AB (2012). Performance characterisation and energy savings of uncovered swimming pool solar collectors under reduced flow rate conditions. *Solar Energy*, 86: 1511–1517.

- Clot MR, Rosa-Clot P, Tina GM (2017). Submerged PV solar panel for swimming pools: SP3. *Energy Procedia*, 134: 567–576.
- Croy R, Peuser FA (1994). Experience with solar systems for heating swimming pools in Germany. *Solar Energy*, 53: 47–52.
- Czarnecki JT (1963). A method of heating swimming pools by solar energy. *Solar Energy*, 7: 3–7.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources. An Introduction. WILEYVCH.
- Dongellini, M., Falcioni, S., Martelli, A., & Morini, G. L. (2015). Dynamic simulation of outdoor swimming pool solar heating. *Energy Procedia*, 81, 1-10.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). Solar engineering of thermal process. John Wiley & Sons, 4a ed.
- Duomarco, J. L., & Pérez, M. (2005, August). Solar heating of swimming pools. In *Building Simulation* (pp. 271-278).
- EIA, U. (2022). Annual energy outlook 2022. *Washington: US Energy Information Administration*.
- EPA (2021). [Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2019. Annex 2 \(Methodology for estimating CO2 emissions from fossil fuel combustion\), Tabla A-47 and Table A-53](#) Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., Washington, D.C. EPA de EE.
- García Valladares, O., Pilatowsky, I. (2017). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gonçalves, R. S., Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2019). Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method. *Energy Reports*, 6, 717-724.
- Haaf W, Luboschik U, Tesche B (1994). Solar swimming pool heating: Description of a validated model. *Solar Energy*, 53: 41–46
- Hassen, A. S. D. (2021). Thermal Performance Prediction of Indoor Swimming Pool Solar

Heating System Using Different Types of Flat-Plate Solar Collectors. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 08-18.

Hottel, H. C., & Whillier, A. (1958). Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy. *The Scientific Base*, 2(Part I).

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6, p. 116). New York: Wiley.

INEGI (2010) *Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 284 Indicadores Principales del Banco de Información INEGI*. Disponible en:

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=02> (Accesado: 17 junio 2022).

International Swimming Pool and Spa Code (ISPSC). *SECTION 311.3: Velocity Limits*. Code of Practice, Internacional Code Council, 2015.

Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.

Jones, G. M., Bosserman, B. E., & Tchobanoglous, G. (Eds.). (2006). *Pumping station design*. Gulf Professional Publishing.

Kampel W, Aas B, Bruland A (2013). Energy-use in Norwegian swimming halls. *Energy and Buildings*, 59: 181–186.

Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62, 1092-1105.

Katsaprakakis DA (2015). Comparison of swimming pools alternative passive and active heating systems based on renewable energy sources in Southern Europe. *Energy*, 81: 738–753.

Kondratyev, K. V. (1969). Radiation in the Atmosphere. *Int. Geophys. Ser.*, 12.

Kokko, J., & Daniels, S. (1999). Solar swimming pool heating. Canada.

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.

- Li, Y., Nord, N., Huang, G., & Li, X. (2021). Swimming pool heating technology: A state-of-the-art review. In *Building simulation* (Vol. 14, pp. 421-440). Tsinghua University.
- Li, Y., Nord, N., Wu, H., Yu, Z., & Huang, G. (2020). A study on the integration of air source heat pumps, solar collectors, and PCM tanks for outdoor swimming pools for winter application in subtropical climates. *Journal of Building Performance Simulation*, 13(6), 662-683.
- Lugo, S., Morales, L. I., Best, R., Gómez, V. H., & García-Valladares, O. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming-pool solar heating system in warm climates. *Solar Energy*, 189, 45-56.
- Makamure, F., Mukumba, P., & Makaka, G. (2021). An analysis of bio-digester substrate heating methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110432.
- Marín, J. D., García, F. V., & Cascales, J. G. (2019). Use of a predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy. *Solar energy*, 179, 380-390.
- Molineaux B, Lachal B, Guisan O (1994). Thermal analysis of five outdoor swimming pools heated by unglazed solar collectors. *Solar Energy*, 53: 21–26.
- McMillan, W. (1971). Heat dispersal-Lake Trawsfynydd cooling studies.
- Nakasima, L. (2015). Desarrollo de un sistema para la producción de biogás a partir de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial mediante un proceso de digestión anaeróbica.
- Nogués, F. S. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)* (Vol. 173). Universidad de Zaragoza.
- Probiomasa (2023). Futuro renovable: biogás como fuente de energía. <http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/Biogas.pdf>
- Robinson, N. (1966). *Solar radiation*, Elsevier, Amsterdam.
- Romanelli, G. P., Ruiz, D. M., & Pasquale, G. A. (2016). Química de la biomasa y los biocombustibles. *Series: Libros de Cátedra*.
- Root DE, Jr (1960). Practical aspects of solar swimming pool heating. *Solar Energy*, 4: 23–24.

- Ruiz, E., & Martínez, P. J. (2010). Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model. *Solar Energy*, 84(1), 116123.
- Suri, M. (2019). Global Solar Atlas 2.0 Technical Report. *Washington, DC: World Bank*.
- Secretaría de Salud. "Norma Oficial Mexicana NOM-245-SSA1-2010, Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas." *Diario Oficial de la Federación*, junio 6, 2012
- SEMARNAT. (2017a). Información sobre residuos sólidos. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Sitio Web <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-yprogramas/residuos-solidosurbanos-rsu>
- Sheinkopf, K. (1997). Solar pool heaters: The simplest use of active solar energy. *Solar Today*, 11(6).
- Singh M, Tiwari GN, Yadav YP (1989). Solar energy utilization for heating of indoor swimming pool. *Energy Conversion and Management*, 29: 239–244.
- Smith, F. G., King, T. A., & Wilkins, D. (2007). *Optics and photonics: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Stefanelli, A. T. P., Marchi Neto, I. D., Scalon, V. L., & Padilha, A. (2010). Evaluating performance from spiral polyethylene tubes as solar collectors for heating swimming pools.
- Thomas Thomas, R. N. (1956). Features of the Solar Spectrum as imposed by the Physics of the Sun. *The Scientific Monthly*, 83(3), 135-144
- Tiwari GN, Sharma SB (1991). Design parameters for indoor swimming-pool heating using solar energy. *Energy*, 16: 971–975.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). *World Population Prospects 2022, Data Sources*. UN DESA/POP/2022/DC/NO. 9
- Vajen, K., & Hilmer, F. (1996). *Solar Hot Water Systems for Public Outdoor SwimmingPools*.
- Van Zyl, G. H. C. (2000). *Solar energy for domestic use* (Doctoral dissertation, Cape Technikon).

Waché, R., Fielder, T., Dickinson, W. E., Hall, J. L., Adlington, P., Sweeney, S. J., & Clowes, S. K. (2020). Selective light transmission as a leading innovation for solar swimming pool covers. *Solar Energy*, 207, 388-397.

Yadav YP, Tiwari GN (1987). Analytical model of solar swimming pool: Transient approach. *Energy Conversion and Management*, 27: 49–54.

Yandri E (2017). The effect of Joule heating to thermal performance of hybrid PVT collector during electricity generation. *Renewable Energy*, 111: 344–352.

Zhao J, Bilbao JI, Spooner ED, Sproul AB (2018). Experimental study of a solar pool heating system under lower flow and low pump speed conditions. *Renewable Energy*, 119: 320–335.