



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de sistemas termo-solares:
desarrollo de un esquema experimental útil
para la determinación de la eficiencia en la
recuperación de la energía térmica**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Jorge Luis Ramírez Reyes

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Salvador Enrique Sánchez Minero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION DE SISTEMAS TERMO-SOLARES: DESARROLLO DE UN ESQUEMA EXPERIMENTAL UTIL PARA LA DETERMINACION DE LA EFICIENCIA EN LA RECUPERACION DE LA ENERGIA TERMICA, que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JORGE LUIS RAMIREZ REYES
Número de cuenta: 317137961

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, principalmente a la Facultad de Ingeniería por el conocimiento teórico y práctico que me fue brindado para llevar a cabo mi formación académica, gracias a todos los docentes que me otorgaron una educación profesional y personal. Muchas gracias por darme la oportunidad de tener una educación superior de la cual me siento orgulloso el día de hoy.

Al equipo de basquetbol de la Facultad de Ingeniería y a UNAM Aero Design, el primero por permitirme cumplir logros personales y poder darle una conclusión adecuada a mi carrera deportiva profesional, el segundo por presentar desafíos en muchas áreas de mi vida, ya que derivaron en una complementación de conocimientos y un desarrollo de habilidades formativas. En ambos casos agradezco a las personas involucradas, por haber sido parte de mi carrera universitaria.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología y al CONAHCYT (proyecto CF-2023-1-1344) por la beca otorgada al ser ayudante de investigación y permitirme realizar el proyecto de tesis. Un agradecimiento especial a la persona que fue el vínculo con estas instituciones, el Dr. Salvador Sánchez. Gracias por la confianza que depositó en mí, su apoyo incondicional, el compromiso, la comprensión; gracias por las nuevas perspectivas sobre mi futuro y el aprendizaje tanto personal como académico que adquirí a lo largo del tiempo en el que trabajamos juntos. Siempre estaré agradecido por todo el apoyo brindado, por ser una guía y un modelo a seguir. Gracias a las personas en el ICAT que hicieron de mi estancia un tiempo tanto de aprendizaje como de gozo.

A mi familia, especialmente a mis padres Jorge y Julia, quienes me proporcionaron un enorme apoyo económico y emocional para concluir mis estudios, siempre mostrando una gran comprensión ante las necesidades o requerimientos que surgieron a lo largo de mi carrera universitaria. Este logro es también de ustedes y espero que los enorgullezca como a mí, debido a que son los promotores de mis sueños y el motivo principal de mi formación actual. Los amo a ustedes y a mis hermanos.

A Silvia y Brisa por el apoyo y la compañía brindada en los diferentes proyectos, tareas y labores en conjunto, disfruté bastante el haber cursado la carrera con ustedes, hicieron de mi estancia en la facultad algo memorable. A Luis Alberto y Diego por estar en los momentos más difíciles de mis estudios e impulsarme a seguir adelante. Gracias a todos mis amigos de la facultad por ser parte de esta experiencia, les deseo el mejor de los éxitos y siempre estarán en mi corazón.

A los sinodales y a todos los que participaron de manera directa o indirecta en este trabajo, les agradezco todo su apoyo.

Índice

1. Introducción.	1
1.1. Motivación del trabajo de tesis.	2
1.2. Objetivo del trabajo de tesis.	2
1.2.1. Objetivo General.	2
1.2.2. Objetivos Particulares.	3
1.3. Antecedentes.	3
1.4. Energía termo-solar sus fundamentos y aplicaciones en ingeniería.	5
1.4.1. Fundamentos de transferencia de calor.	5
1.4.2. Radiación solar, el espectro infrarrojo, y sus efectos sobre la superficie terrestre.	11
1.4.3. La energía termo-solar, fuente de energía abundante y sustentable.	14
1.4.3.1. Concentradores y captadores solares.	15
1.4.3.2. Aplicaciones domésticas, industriales y de generación eléctrica.	19
1.4.4. Limitaciones y desventajas de los sistemas termo-solares.	21
1.4.5. Almacenamiento de energía térmica, retos y oportunidades.	23
1.5. Propuesta de estudio.	26
2. Planteamiento del problema.	29
2.1. Modelo de estudio.	30
2.1.1. Esquema del sistema termo-solar.	30
2.1.2. Balance de energía térmica en el sistema propuesto.	30
2.2. Variables de estudio, datos por recabar, y cálculo de la ganancia de energía.	33
2.2.1. Definición de las variables que intervienen en el modelo de estudio.	33
2.2.2. Variables de control del sistema.	34
2.2.3. Evaluación de la ganancia de energía en las diferentes secciones del sistema.	35
3. Metodología experimental empleada para el estudio.	38
3.1. Configuración experimental del modelo de estudio (arreglo experimental).	39

3.2. Evaluación del flujo másico en el sistema.	44
3.3. Adquisición de datos experimentales.	46
3.3.1. Termistores su selección y calibración.	46
3.3.2. Adquisición de datos mediante termistores.	52
3.3.3. Adquisición de datos mediante cámara termográfica y su evaluación.	53
3.3.4. Evaluación de datos de termistores mediante técnicas de pos- procesamiento de datos.	53
4. Análisis de resultados y discusión.	55
4.1. Comportamiento de la temperatura en el sistema (tiempo).	56
4.2. Efectos del flujo másico en la ganancia de energía del sistema.	60
4.3. Efectos de las condiciones ambientales.	64
4.4. Almacenamiento de energía.	65
5. Conclusiones.	69
5.1. Trabajos futuros	71
Referencias.	72
Anexo	75
A.1. Código de calibración de termistores y obtención de datos.	76
A.2. Resistencias variables y sus respectivas filtraciones por experimento.	78
A.3. Medidas de asimetría y apuntamiento por experimento.	79

Índice de Figuras

Figura 1.1	Prensa de impresión energizada por un Colector Parabólico en la Feria Mundial de París de 1878.	3
Figura 1.2	Bomba de irrigación solar de 1913 en Egipto.	4
Figura 1.3	Esquema de la instalación de una planta de energía de colector parabólico con almacenamiento químico.	5
Figura 1.4	Propiedades de la irradiación en un material semitransparente.	10
Figura 1.5	Espectro electromagnético.	12
Figura 1.6	Incidencia de los rayos solares con la inclinación terrestre.	13
Figura 1.7	Efecto de la época del año en la relación de la radiación extraterrestre con la constante solar nominal.	13
Figura 1.8	Radiación solar al entrar a la atmósfera terrestre.	14
Figura 1.9	Esquema básico de circuito abierto.	15
Figura 1.10	Esquema básico de circuito cerrado.	15
Figura 1.11	Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de agua caliente sanitaria.	16
Figura 1.12	Captador solar plano.	16
Figura 1.13	Colector solar de tubos.	16
Figura 1.14	Configuración de un captador plano de tubos paralelo.	17
Figura 1.15	Vista transversal de un colector de tubos heat-pipe.	17
Figura 1.16	Sistema de Concentradores lineales de Fresnel (LFR).	18
Figura 1.17	Sistema de Receptor Central.	18
Figura 1.18	Sistema de Disco Parabólico.	18
Figura 1.19	Canales Parabólicos.	18
Figura 1.20	Distribución porcentual de viviendas que usan calentador de agua por regiones climáticas según tipo de calentador: modificación de ENCEVI (2018).	19
Figura 1.21	Sistema termosolar para climatización de piscina a la intemperie.	20
Figura 1.22	Sistema termosolar para calefacción por suelo radiante.	20
Figura 1.23	Ivanpah, huertos solares en el desierto de Mojave, Estados Unidos.	21
Figura 1.24	Plataforma Solar de Extremadura Solaben, España.	21

Figura 1.25	Funcionamiento básico del almacenamiento de energía térmica en acuíferos.	24
Figura 1.26	Principio del sistema de almacenamiento de calor sensible con dos tanques.	25
Figura 1.27	Irradiación Global Horizontal: Promedio anual a largo plazo de resúmenes diarios/anuales.	27
Figura 1.28	Irradiación Normal Directa: Promedio anual a largo plazo de resúmenes diarios/anuales.	27
Figura 2.1	Diagrama del sistema termosolar experimental.	30
Figura 3.1	Aislante térmico acústico de fibra de vidrio con aluminio.	39
Figura 3.2	Estructura de la base del colector solar.	39
Figura 3.3	Colector solar en su base.	39
Figura 3.4	Solar Heater Mat.	40
Figura 3.5	Tambo de plástico experimental.	41
Figura 3.6	Tanque de almacenamiento con recubrimiento de fibra de vidrio con aluminio.	41
Figura 3.7	Adaptador del tanque para el tercer termo-pozo.	41
Figura 3.8	Bomba eléctrica periférica para agua.	41
Figura 3.9	Válvula de compuerta 1 pulgada dorado muller.	42
Figura 3.10	Elementos principales: Colector solar y tanque de almacenamiento.	42
Figura 3.11	Elementos principales: Bomba de circulación y válvula de corte.	42
Figura 3.12	Conexión para los termo-pozos (1,2).	43
Figura 3.13	Conexión de adaptador para la entrada y la salida del colector solar.	43
Figura 3.14	Prueba de funcionamiento del circuito experimental.	43
Figura 3.15	Termocélula de acero inoxidable 200 para sensor de temperatura: longitud de 30 y 150 [mm].	44
Figura 3.16	Sistema termosolar experimental.	44
Figura 3.17	Experimento 1.	45
Figura 3.18	Experimento 2.	45
Figura 3.19	Experimento 3.	46
Figura 3.20	Experimento 4.	46

Figura 3.21	Termistores NTC 100K.	46
Figura 3.22	Cámara Termográfica.	46
Figura 3.23	Termómetro de Contacto.	46
Figura 3.24	Diagrama divisor de Voltaje.	47
Figura 3.25	Dimensiones del USB-6008 NI.	48
Figura 3.26	Conexiones del USB-6008 NI.	48
Figura 3.27	Conexión de termistores experimental.	48
Figura 3.28	Criostato de circulación CORIO CD 201F.	49
Figura 3.29	Gráfica resistencia vs temperatura T_{m1}	50
Figura 3.30	Gráfica resistencia vs temperatura T_{m2}	50
Figura 3.31	Gráfica resistencia vs temperatura T_{m3}	50
Figura 3.32	Gráfica resistencia vs temperatura T_{m4}	50
Figura 3.33	Gráfica de señales filtradas para la calibración de los cuatro termistores.	50
Figura 3.34	Gráfica de regresiones polinomiales de los cuatro termistores.	51
Figura 3.35	Sistema termosolar con equipo de adquisición de datos.	52
Figura 4.1	Foto termográfica del colector solar en el experimento 1.	56
Figura 4.2	Foto termográfica del colector solar en el experimento 2.	56
Figura 4.3	Foto termográfica del colector solar en el experimento 3.	56
Figura 4.4	Foto termográfica del colector solar en el experimento 4.	56
Figura 4.5	Gráfica de temperaturas en el Experimento 1.	57
Figura 4.6	Gráfica de temperaturas en el Experimento 2.	58
Figura 4.7	Gráfica de temperaturas en el Experimento 3.	58
Figura 4.8	Gráfica de temperaturas en el Experimento 4.	59
Figura 4.9	Diagrama de caja del experimento 1.	60
Figura 4.10	Diagrama de caja del experimento 2.	61
Figura 4.11	Distribución normal del experimento 3.	62
Figura 4.12	Distribución normal del experimento 4.	62
Figura 4.13	Energías internas en cada experimento.	63
Figura 4.14	Flujos de calor por radiación en cada experimento.	64

Figura 4.15	Flujos de calor perdido por radiación en cada experimento.	65
Figura 4.16	Flujos de calor neto en cada experimento.	66
Figura 4.17	Foto termográfica superior del tanque de almacenamiento.	66
Figura 4.18	Eficiencias térmicas experimentales.	67
Figura A.1	Gráfica de resistencias Exp 1.	78
Figura A.2	Gráfica de resistencias filtradas Exp 1.	78
Figura A.3	Gráfica de resistencias Exp 2.	78
Figura A.4	Gráfica de resistencias filtradas Exp 2.	78
Figura A.5	Gráfica de resistencias Exp 3.	78
Figura A.6	Gráfica de resistencias filtradas Exp 3.	78
Figura A.7	Gráfica de resistencias Exp 4.	79
Figura A.8	Gráfica de resistencias filtradas Exp 4.	79

Índice de Tablas

Tabla 1.1	Conductividades térmicas de diferentes materiales.	8
Tabla 1.2	Emisividad de diferentes materiales.	10
Tabla 1.3	Energía solar-eléctrica obtenida de zonas con alta insolación.	22
Tabla 1.4	Irradiación promedio por día en la región de México.	27
Tabla 1.5	Irradiación promedio en la región de Tizayuca, México.	28
Tabla 2.1	Temperaturas variables en el modelo de estudio.	34
Tabla 2.2	Flujos máxicos y gastos volumétricos teóricos en cada experimento.	35
Tabla 3.1	Flujos máxicos y gastos volumétricos en cada experimento.	45
Tabla 3.2	Conexiones de entrada analógica y mediciones en la PCB por cada termistor.	49
Tabla 3.3	Constantes de cada modelo de regresión polinomial.	51
Tabla 4.1	Temperaturas ambientales por experimento.	57
Tabla 4.2	Valores del diagrama de caja del experimento 1.	60
Tabla 4.3	Valores del diagrama de caja del experimento 2.	61
Tabla 4.4	Valores de las distribuciones normales en los experimentos 3 y 4.	61
Tabla 4.5	Constantes del modelo de regresión lineal.	64
Tabla 4.6	Flujos de calor adquirido y perdido por radiación.	64
Tabla 4.7	Flujos de calor involucrados en la eficiencia térmica.	67
Tabla A.1	Valores de Asimetría y Curtosis en los flujos de calor por radiación y convección.	79

Nomenclatura

A	Área transversal, m^2
A_s	Área superficial, m^2
c_p	Calor específico a presión constante, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p_{agua}}$	Calor específico a presión constante del agua, $4,180 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{prom}	Calor específico promedio, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
E	Energía, J
\dot{E}	Razón de transferencia de energía, W
G	Gasto volumétrico, $L \cdot min^{-1}$
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
I_0	Constante solar, $W \cdot m^{-2}$
I	Irradiación solar, $W \cdot m^{-2}$
I_G	Irradiación, $W \cdot m^{-2}$
k	Conductividad térmica, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
m	Masa, kg
\dot{m}	Flujo másico, $kg \cdot s^{-1}$
Q	Calor, J
\dot{Q}_{cond}	Flujo de calor por conducción, W
\dot{Q}_{conv}	Flujo de calor por convección, W
\dot{Q}_{rad}	Flujo de calor por radiación, W
$\dot{Q}_{rad-solar}$	Flujo de calor por radiación en la superficie solar, $73,483.2 kW \cdot m^{-2}$
$\dot{Q}_{rad-total}$	Flujo de calor total, W
\dot{Q}_{PR}	Flujo de calor perdido por radiación, W
Q_s	Calor sensible, J
\dot{Q}_n	Flujo de calor neto del sistema, W
R_0	Resistencia fija, $V \cdot A^{-1}$
R_t	Resistencia variable, $V \cdot A^{-1}$
r	Radio del tanque de almacenamiento, m
r_f	Radio de la fotosfera, $6.47 \times 10^8 m$
r_{d_0}	Distancia radial promedio del Sol a la Tierra, $150 \times 10^9 m$
T	Temperatura, $^{\circ}C$
T_i	Temperatura inicial del agua almacenada en el experimento, $^{\circ}C$
T_f	Temperatura final del agua almacenada en el experimento, $^{\circ}C$
T_{amb}	Temperatura ambiente, K
T_s	Temperatura absoluta de la superficie, K
t_i	tiempo inicial del experimento, s

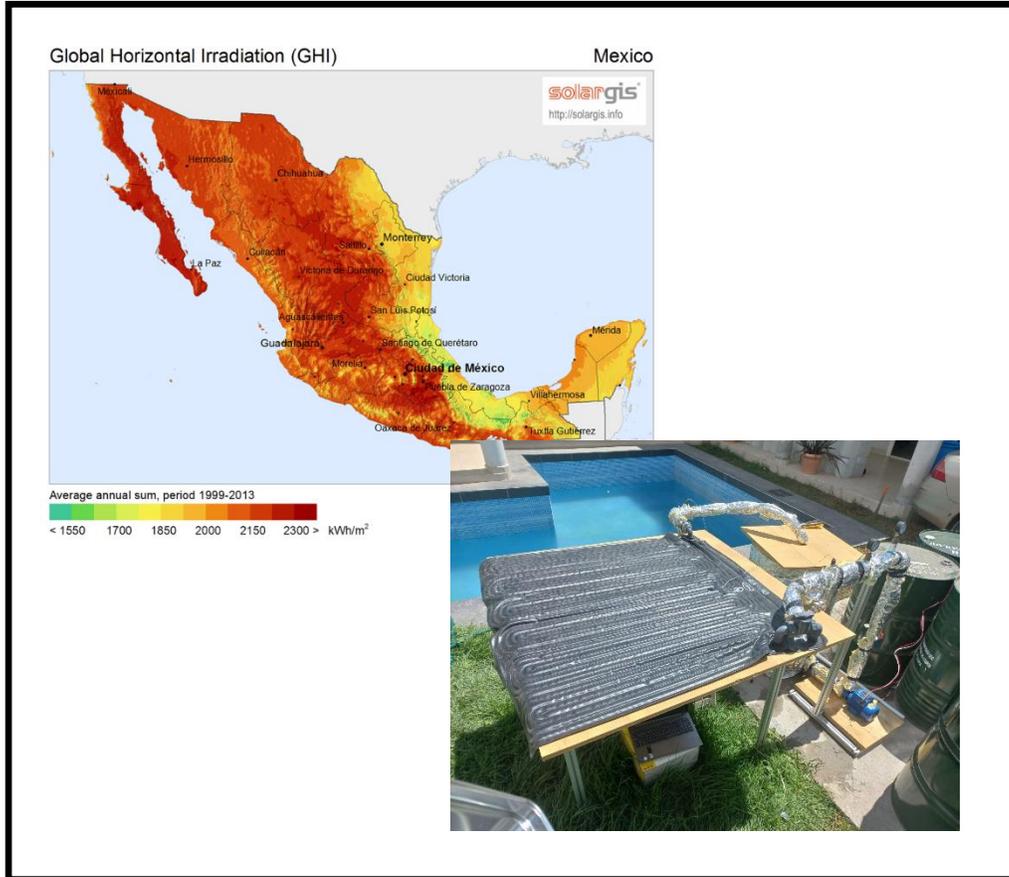
t_f	tiempo final del experimento, s
U	Energía interna, J
U_i	Energía interna inicial, J
U_f	Energía interna final, J
V	Volumen, m^3
V_{in}	Voltaje de alimentación, $W \cdot A^{-1}$
V_{out}	Voltaje de salida, $W \cdot A^{-1}$
\underline{v}	Velocidad del fluido, $m \cdot s^{-1}$
x	Posición, m

Letras griegas

α_G	Absortividad, $W \cdot m^{-2}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5.68 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
ε	Emisividad, 1
ε_c	Emisividad del colector, 0.95
$\eta_{tér}$	Eficiencia térmica, 1
$\eta_{T.tér}$	Eficiencia teórica térmica, 1
ρ	Densidad, $kg \cdot m^{-3}$
ρ_a	Densidad del agua, $996 kg \cdot m^{-3}$
ρ_G	Reflectividad, $W \cdot m^{-2}$
τ_G	Transmisividad, $W \cdot m^{-2}$

Subíndices

\dot{m}_n	Flujo másico del n-ésimo experimento
G_n	Gasto volumétrico del n-ésimo experimento
T_{m1}	Datos del termistor a la entrada del colector
T_{m2}	Datos del termistor a la salida del colector
T_{m3}	Datos del termistor en el tanque
T_{m4}	Datos del termistor en la superficie del colector
t_n	Tiempo de llenado del n-ésimo experimento



CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación del trabajo de tesis.

La motivación de este trabajo se sustenta en la creciente necesidad que tiene el ser humano en captar, almacenar y utilizar fuentes de energía cada vez más amigables con el medio ambiente. Actualmente, todas las previsiones estimadas sobre el cambio climático han sido superadas, enormes esfuerzos para combatirlo se realizan día con día, sin embargo, debido al aumento poblacional a nivel global, la necesidad de energía es cada día mayor, y la utilización de fuentes de energía convencionales solo va en aumento. Es claro, la principal limitante del uso de fuentes amigables con el medio ambiente no es su disponibilidad y abundancia, la causa radica en la intermitencia de esta y en su calidad.

En estos tiempos, los avances en la tecnología ya permiten el uso de fuentes alternas de energía, tanto en sistemas convencionales como es el caso de la generación, distribución y consumo de electricidad, como en casos productivos, recreativos y de la vida diaria donde el uso parcial de fuentes alternas puede reducir grandemente el consumo de energéticos convencionales. En particular, el caso de la energía solar es un tema medular, esto porque dicha fuente representa cientos y/o miles de veces la energía que se consume anualmente. La energía solar es abundante y no requiere ser transportada, el tema principal es poder evaluar su calidad y la pertinencia de su uso en una infinidad de aplicaciones. Por ejemplo, en el calentamiento y procesamiento de agua para consumo humano, fuente de energía para diferentes procesos alimenticios e industriales, generación puntual de electricidad, etc.

La calidad de la energía solar que reciben ciertos lugares es diferente. En el caso de la componente termo-solar, existen múltiples factores los cuales intervienen para poder cuantificar la energía que puede ser utilizada, aspectos tales como la localización geográfica, altura sobre el nivel del mar, clima, etc., son factores que pueden afectar la viabilidad del uso de este tipo de energía. Por lo tanto, en el presente trabajo se plantea un procedimiento para poder medir la calidad de la energía termo-solar, esto con la finalidad de poder definir las variables y procedimientos que permiten calcular la ganancia energética de los sistemas termo-solares.

1.2 Objetivo del trabajo de tesis.

1.2.1. Objetivo General.

Desarrollar un procedimiento experimental útil para el cálculo de la ganancia energética de sistemas termo-solares. Principalmente, definir las variables que intervienen en la evaluación, y así, poder asociar estas a la cantidad de energía (térmica) que puede ser almacenada por los sistemas actuales.

1.2.2. *Objetivos Particulares.*

Poner en práctica el modelo de evaluación propuesto mediante la construcción de un entorno experimental, lo cual involucra:

- Calibrar los elementos principales de instrumentación.
- Adquirir y ensamblar los componentes de obtención, transporte y almacenaje de energía térmica.
- Censar y almacenar las temperaturas experimentales.
- Analizar las ganancias energéticas

Finalmente, determinar si este modelo de evaluación puede ser utilizado en otro tipo de evaluaciones para los sistemas termo-solares.

1.3 *Antecedentes.*

El uso de la energía solar data a partir del año de 1774, cuando el químico francés Lavoisier junto con el científico inglés Joseph Priestley desarrollaron la teoría de combustión, en la cual los rayos del sol fueron concentrados hacia un tubo de ensayo que contenía óxido de mercurio, de tal manera que el gas producido fuera capaz de incinerar una vela. Sin embargo, el aprovechamiento para aplicaciones en la industria se da a partir del año de 1878 en la feria mundial de París, en donde se da a conocer una planta de energía solar a una escala reducida. Dicha planta funcionaba a partir de un concentrador parabólico solar, el cual concentraba los rayos solares haciendo que una caldera generara el vapor necesario para operar un pequeño motor alternativo de vapor, esto para el funcionamiento de una prensa de impresión (ver figura 1.1).

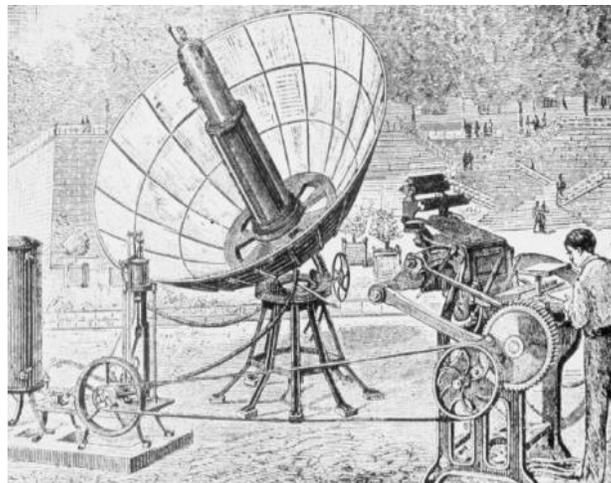


Figura 1.1. Prensa de impresión energizada por un colector parabólico en la feria mundial de París de 1878 [1].

Se continuaron desarrollando máquinas impulsadas por energía solar a una mayor escala, las cuales tuvieran un mejor aprovechamiento energético para posicionar este tipo de energía en la industria. En el año de 1913 el ingeniero estadounidense F. Shuman, junto con C.V. Boys, construyeron una bomba de riego con base en concentradores solares (ver figura 1.2). Localizada en el río Nilo en Egipto, la bomba de irrigación solar tenía una potencia de 50 [HP] y concentraba la radiación solar hacia una tubería principal mediante elementos parabólicos.

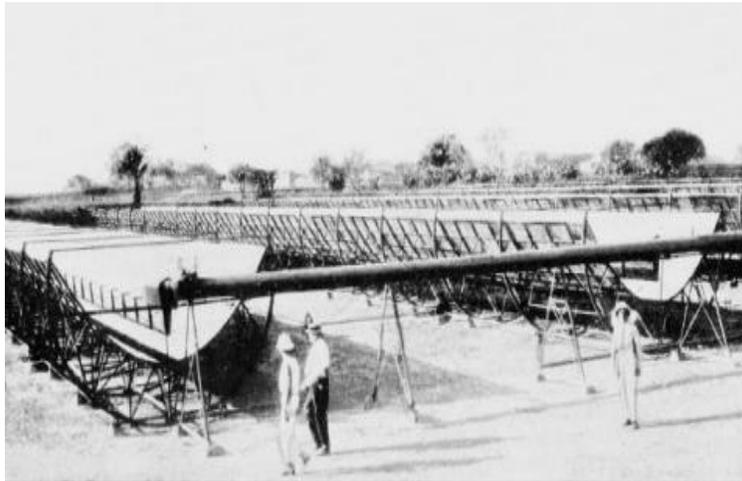


Figura 1.2. Bomba de irrigación solar de 1913 en Egipto [1].

Debido al costo, implementación y eficiencia, las aplicaciones de la energía solar se desarrollaron mayormente en reuniones o conferencias acerca de las energías futuras, dichos eventos fueron llevados a cabo por la UNESCO, la Asociación para la Energía Solar Aplicada, la Academia Nacional de Ciencias de E.U., y las Naciones Unidas, principalmente, durante el periodo de 1954 a 1961. No fue hasta la década de 1980 que se tuvo un mayor impulso hacia este tipo de energía a nivel industrial, con la elaboración del colector parabólico de tipo comercial, el cual fue implementado en las centrales eléctricas para la producción de energía eléctrica. Con esta tecnología se elaboraron nueve sistemas SEGS (Solar Energy Generating System) en California, los cuales tenían una capacidad de producción total de 354 MW. Posteriormente, hasta el año 2007 se da un avance significativo, con la fabricación de una planta de energía de colector parabólico comercial en Las Vegas, la planta producía de manera individual 75 MW. A partir de aquel año; en Estados Unidos, Europa y Asia; se progresa en investigaciones y desarrollo comercial sobre la tecnología CSP (Concentrated Solar Thermal Power) [1].

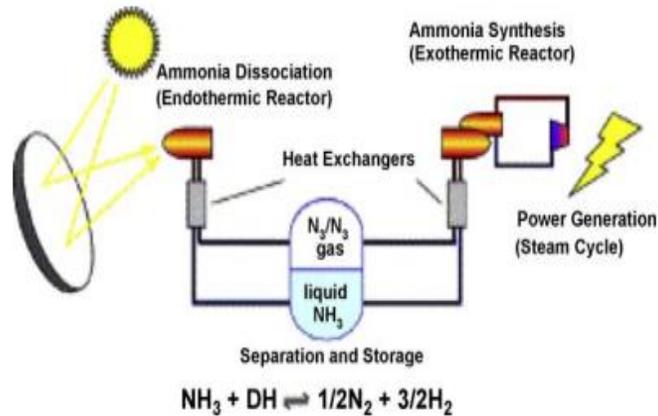


Figura 1.3 Esquema de la instalación de una planta de energía de colector parabólico con almacenamiento químico [2].

1.4 Energía termosolar sus fundamentos y aplicaciones en ingeniería.

1.4.1 Fundamentos de transferencia de calor.

El calor es una forma de energía capaz de ser transferida de un sistema a otro debido a la diferencia de temperaturas. Mientras que la transferencia de calor es la ciencia que estudia y determina las razones de esta transferencia de calor entre sistemas, la cual siempre ocurre a partir de una temperatura mayor a una menor, la energía interna de un sistema es la cantidad de energía térmica que almacena un cuerpo (sistema), y se manifiesta en forma de calor sensible y/o latente. El primero está relacionado con la energía cinética a nivel molecular (actividad de las moléculas), y el segundo con la energía requerida para llevar a cabo un cambio de fase de la materia.

La energía que se requiere para incrementar un grado la temperatura por unidad de masa de un fluido es denominada como calor específico, el cual se puede determinar con presión o volumen constante, dando lugar así al calor específico a presión constante (c_p), y al calor específico a volumen constante (c_v); estos parámetros se utilizan para determinar cambios en la entalpía y en la energía interna, respectivamente. En un mismo fluido ambos tipos de calores son dependientes de dos propiedades independientes entre sí: presión y temperatura, sin embargo, la energía suministrada al modificar el volumen para mantener una presión constante provoca que el calor específico a presión constante sea de mayor valor que el calor específico a volumen constante. Si se tiene un fluido incompresible, entonces los calores específicos presentan una igualdad, debido a que no hay cambio en el volumen específico al modificar la presión o la temperatura. Por lo tanto, en fluidos incompresibles se utiliza el calor específico promedio, el cual únicamente es dependiente de la temperatura evaluada a un valor promedio, y permite calcular el cambio de la energía interna de sólidos y líquidos como se muestra en la ecuación (1.1). Acorde a lo expuesto por Yunus Cengel, el calor específico promedio para el agua en un rango de 20 a 35 [°C] es $4,180 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$, dentro del mismo rango, el valor de su densidad es $996 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ [3].

$$\Delta U = mc_{prom} \Delta T \quad (1.1)$$

En la transferencia de energía ocurren cambios en la energía total del sistema, los cuales, según el principio de conservación de energía, son iguales a la diferencia entre la energía total de entrada y la energía total de salida. Para la transferencia de calor se toma en cuenta únicamente la energía relacionada a una diferencia de temperaturas, de tal forma que el balance energético queda expresado como se muestra en la ecuación (1.2). Donde el calor generado (Q_{gen}) es una conversión de energía de procesos químicos, nucleares, eléctricos o mecánicos, los cuales ocurren en el sistema al momento de la transferencia [3].

$$\Delta E_{t\acute{e}rmica} = Q_{entrada} - Q_{salida} + Q_{gen}[J] \quad (1.2)$$

Un proceso estacionario consiste en que la energía total del sistema no sufre alteraciones con el tiempo, por lo cual el cambio de energía total en el sistema es cero ($dE_{total}/dt = 0$), en otras palabras, la energía en forma de trabajo, calor o propiamente la masa que ingresa al sistema es la misma que sale de este, en un intervalo de tiempo, ecuación (1.3) [4].

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \quad (1.3)$$

En la práctica se establece el concepto de volumen de control con el objetivo de estudiar el estado de un sistema, y así, determinar sus modificaciones energéticas a lo largo de un intervalo de tiempo. Para un volumen de control que presenta un flujo estacionario se considera que tiene un gasto másico constante, es decir, que el flujo másico que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo e ingresa al sistema es igual al flujo másico que sale del sistema, por consiguiente, las velocidades de entrada y salida involucradas en estos flujos deben ser iguales. En el mismo caso, si se tiene un fluido incompresible, se puede asumir que el gasto volumétrico será constante. Es posible comprobar dichas sentencias a partir de las definiciones matemáticas para el gasto másico (1.4), y el gasto volumétrico (1.5).

$$\dot{m} = \rho v A \quad (1.4)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{\rho} [m^3/s] \quad (1.5)$$

La transferencia de calor neto (\dot{Q}_n) en un volumen de control asumiendo flujo estacionario es equivalente al producto del cambio entálpico (Δh) por el flujo másico (\dot{m}), o bien, como se expresa en la ecuación (1.6), la cual representa el balance de energía para flujos estacionarios. Dicho balance es válido, si y solo si, no existe interacción de trabajo y se desprecian los cambios de energía cinética y potencial.

$$\dot{Q}_n = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1.6)$$

De igual forma que un volumen de control, una superficie se puede estudiar para su análisis energético, sin embargo, no cuenta con volumen o masa, por lo cual se considera como un sistema de energía constante, es decir, su cambio de energía total es cero ($dE_{total}/dt = 0$). Entonces el balance de energía de una superficie es igual a la ecuación (1.3), tanto para condiciones estacionarias como transitorias, y equivale a la transferencia de calor de la ecuación (1.2); aquí, el calor generado no tiene lugar, esto debido a que no se tiene un volumen. El calor tiene tres mecanismos por los cuales puede ser transferido: por conducción, convección, y radiación. La transferencia de calor en una superficie equivale a la interacción de estos tres mecanismos para un cambio energético total de cero. Aquí, los signos de la ecuación (1.7) indican la dirección que presentan los flujos de calor, y como interactúan entre ellos [3].

$$\dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} = 0 \quad (1.7)$$

Conducción

La conducción es un mecanismo de transferencia de calor que va de un cuerpo con mayor energía a otro con menor energía, esto por medio de sus partículas adyacentes. Es decir, la conductividad se lleva a cabo entre dos sustancias que se encuentren en contacto físico directo, se puede dar entre sólidos, líquidos, o gases, además de una interacción entre ellos. Debido a que se requiere de un medio físico, la rapidez con la cual se lleva a cabo la transferencia es dependiente del tipo de material involucrado, su configuración geométrica, el espesor del medio, y la diferencia de temperatura. Se cuantifican estas dependencias a partir de la Ley de Fourier, ecuación (1.8) [4].

$$\dot{Q}_{cond} = -kA_s \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.8)$$

Conductividad térmica

Yunus Cengel define la conductividad térmica como “la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura”. En otras palabras, es una variable cuantitativa que mide la capacidad de conducción de calor de un material, entre mayor sea su valor, mayor será la facilidad que tiene el material para llevar a cabo la conducción. Un material aislante presenta cantidades bajas de conductividad térmica, por lo regular esto a partir de valores menores a la unidad. Así mismo, se sabe que para un mismo material la conductividad térmica varía con respecto a su temperatura, en algunos materiales como el cobre y el aluminio, en su estado sólido, se incrementa su valor al aproximarse al cero absoluto de temperatura. También existe una dependencia de esta variable con respecto al estado de la materia, ya que alcanza números mayores en sustancias sólidas, después en líquidas, y finalmente en gaseosas, esto debido a la naturaleza propia del mecanismo de transferencia de calor. Para algunas aplicaciones físicas, la conductividad térmica se evalúa a una temperatura promedio, con lo cual, puede ser considerada constante bajo ciertas reservas y/o circunstancias [3].

Tabla 1.1. Conductividades térmicas de diferentes materiales [3].

<i>Material</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>Conductividad Térmica [kW · m⁻¹ · °C⁻¹]</i>
<i>Aluminio (1100)</i>	<i>24</i>	<i>222</i>
<i>Acero inoxidable</i>	<i>24</i>	<i>15.6</i>
<i>Fibra de vidrio</i>	<i>30</i>	<i>0.036-0.039</i>
<i>Pino (Madera)</i>	<i>24</i>	<i>0.115</i>
<i>Agua</i>	<i>0</i>	<i>0.569</i>
	<i>30</i>	<i>0.618</i>
<i>Polipropileno</i>	<i>26.85</i>	<i>0.12</i>

Convección

El segundo mecanismo de transferencia de calor es la convección. Al igual que la conducción, este mecanismo requiere de un medio material para llevarse a cabo, la diferencia radica en la dinámica de los fluidos, pues este mecanismo requiere de una superficie sólida y un fluido adyacente en movimiento, ya sea líquido o gaseoso, para llevar a cabo la transferencia de calor. La convección es dependiente de la rapidez (movimiento) que presente el flujo de los fluidos, y puede presentarse de manera forzada o natural. En la convección natural el movimiento del fluido es causado por fuerzas de empuje inducidas por diferencias de densidades del fluido, las cuales a su vez son ocasionadas por una diferencia de temperaturas; caso contrario, en la convección forzada el movimiento del fluido se debe a un agente externo. En ausencia de movimiento del fluido, la transferencia de calor se da únicamente en la superficie sólida mediante conducción. Se define la rapidez de su transferencia de calor mediante la ecuación (1.9), también conocida como la Ley de Newton de enfriamiento, en donde se puede observar que la convección es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie (T_s) y el ambiente (T_{amb}).

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{amb}) \quad (1.9)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) es un parámetro experimental que depende de las variables que influyen en la convección, como el área superficial involucrada, las propiedades del fluido, la velocidad de este mismo, solo por mencionar algunas. Aunque existen valores típicos, lo cierto es que esta cantidad depende mucho de las condiciones presentes al momento de la transferencia de calor [4].

Radiación

La radiación es el tercer mecanismo de transferencia de calor, el cual se lleva a cabo sin la presencia de un medio material, es decir, es el único mecanismo capaz de transmitir esta forma de energía en el vacío, sin sufrir atenuaciones. Se realiza mediante ondas electromagnéticas que representan los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos, dando como resultado energía, la cual posteriormente es emitida por la materia. En este sentido, la transferencia de calor por radiación se lleva a cabo en materia sólida, líquida y gaseosa, dada su previa definición se considera un fenómeno volumétrico, con excepción de los sólidos, en cuyo caso es un fenómeno mayormente superficial. Sus propiedades son la emisividad, la absorptividad, la transmisividad, y la reflectividad. Para describir las propiedades que posee la radiación se establece el concepto de cuerpo negro, el cual es definido como aquel cuerpo capaz de absorber y emitir uniformemente la radiación de manera perfecta, en otras palabras, es capaz de absorber todo tipo de radiación a cualquier longitud de onda y, para una misma temperatura y longitud de onda, ningún cuerpo puede emitir mayor radiación que un cuerpo negro.

La emisividad se define como la razón de la radiación emitida por una superficie dada entre la radiación emitida por un cuerpo negro, para una misma temperatura. Por tanto, sus valores se encuentran en el rango de cero a uno, dando lugar a la ecuación (1.10) que determina la cantidad de energía en forma de radiación que es capaz de emitir un cuerpo por unidad de área superficial y unidad de tiempo. La radiación que emite un cuerpo negro se describe sustituyendo en dicha ecuación el valor máximo de emisividad igual a la unidad ($\varepsilon = 1$), a la cual se le conoce como la ley de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon A_s T_s^4 \quad (1.10)$$

En una superficie real la emisividad no es constante, ya que esta depende de la temperatura, la longitud de onda, y la dirección de la radiación emitida. Si en una superficie la emisividad es independiente de la dirección de la radiación emitida, se le conoce como superficie difusa; y si es independiente a la longitud de onda, se le conoce como superficie gris. En la práctica, las superficies reales se aproximan a los conceptos de superficie gris y/o difusa, en cuyo caso se hace uso de una emisividad hemisférica total, o emisividad promedio, la cual únicamente depende de la temperatura [5].

Tabla 1.2. Emisividad de diferentes materiales [3,6]

<i>Material</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>Emisividad ε[1]</i>
<i>Aluminio (Pulido)</i>	26.85-626.85	0.04-0.06
<i>Acero inoxidable (Pulido)</i>	26.85-226.85	0.08-0.14
<i>Fibra de vidrio</i>	26.85	0.80
<i>Roble (Madera)</i>	26.85	0.90
<i>Agua</i>	0-100	0.95
<i>Plásticos opacos de cualquier color</i>	25	0.95

Además de una emisión constante, todo cuerpo recibe radiación. El flujo de radiación que llega a una superficie se denomina irradiación (I_G), la cuál se relaciona con tres propiedades de la radiación: la absorptividad (α_G), la transmisividad (τ_G) y la reflectividad (ρ_G). La primera consiste en la fracción de irradiación que es absorbida o contenida en la superficie, la segunda es la fracción que atraviesa o deja pasar la misma superficie y, por último, la reflectividad es la fracción de la irradiación que es reflejada hacia el entorno, en consecuencia, estas tres propiedades presentan valores en un rango de cero a uno. En la figura 1.4, se observa la división del flujo de radiación incidente.

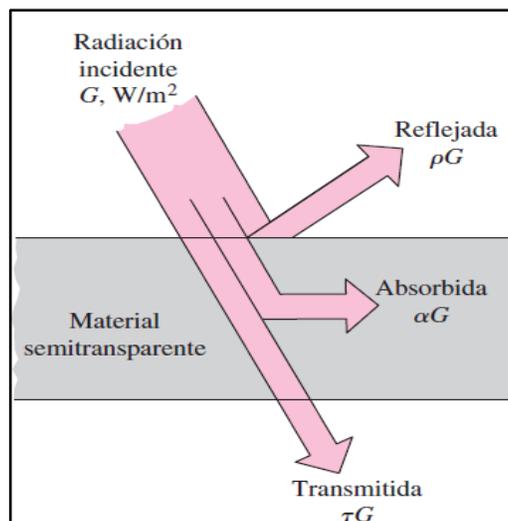


Figura 1.4. Propiedades de la irradiación en un material semitransparente [3].

Un cuerpo negro tiene una absorptividad perfecta ($\alpha = 1$), es decir absorbe toda la radiación que llega a su superficie. De acuerdo con la Ley de Kirchhoff de la radiación, ecuación (1.11), la absorptividad

y la emisividad son iguales para una temperatura y longitud de onda dadas. Por lo tanto, en aplicaciones se considera que la absorptividad promedio es igual a la emisividad promedio.

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (1.11)$$

Como ya se mencionó, todo cuerpo se encuentra en constante emisión y absorción de radiación, la diferencia entre sus razones es propiamente la transferencia neta de calor de una superficie con otra, o con el ambiente. Según Yunus Cengel, si una superficie se encuentra completamente encerrada por una superficie mucho más grande y separada por un gas, el cual no interfiere con la radiación, como lo es el aire, entonces la razón neta de transferencia de calor por radiación de dicha superficie con los alrededores (\dot{Q}_{rad}), se describe con la ecuación (1.12) [5].

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (1.12)$$

La transferencia de calor total se lleva a cabo mediante uno o, regularmente, dos mecanismos de transferencia, aun así, no es posible que todos se encuentren involucrados en el mismo medio. Dependiendo de la aplicación se puede establecer qué mecanismos se encuentran involucrados, por ejemplo, para el caso planteado en el párrafo anterior, la transferencia total de calor se da por radiación desde la superficie, y por conducción o por convección entre la superficie y el entorno alrededor, como se enuncia en la ecuación (1.13) [3].

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cond/conv} \quad (1.13)$$

1.4.2 Radiación solar, el espectro infrarrojo, y sus efectos sobre la superficie terrestre.

Las ondas electromagnéticas son conocidas también como radiación electromagnética, la cual se puede caracterizar por su longitud de onda (λ), o su frecuencia (ν). Al parametrizar esta radiación mediante la longitud de onda se distinguen diferentes comportamientos que dan lugar al espectro electromagnético [1]. El espectro electromagnético abarca longitudes de onda desde menos de $10^{-10}(\mu m)$, hasta más de $10^{10}(\mu m)$, figura 1.5 [3].

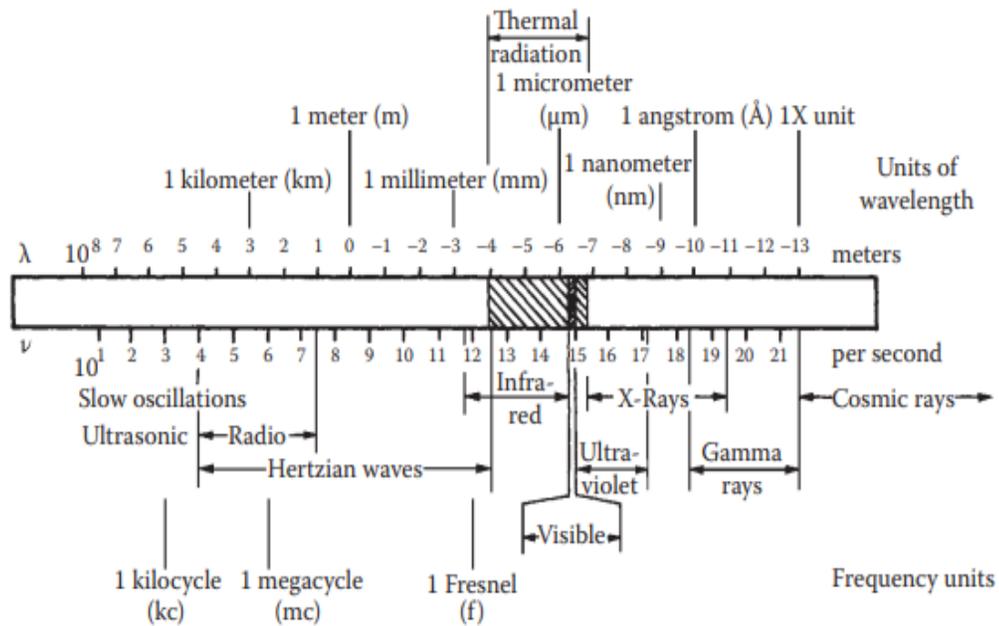


Figura 1.5 Espectro electromagnético [1].

Radiación Térmica

La radiación térmica en el espectro electromagnético que parte de 0.1 hasta 100 $[\mu\text{m}]$ de longitud de onda, abarca toda la radiación visible e infrarroja, y parte de la radiación ultravioleta. Es emitida y absorbida de forma continua por toda materia con temperatura mayor al cero absoluto [3].

Radiación solar

El sol es una estrella pequeña que libera energía a partir de un proceso continuo de fusión nuclear entre átomos de hidrógeno. La energía es detonada en su núcleo, pasa a la zona de radiación, y se demora aproximadamente 170 años en llegar a la zona de convección. Posteriormente atraviesa la superficie solar, también conocida como la fotosfera, la cual tiene 5,500 $[\text{°C}]$ de temperatura media, e igualmente, es considerada la primera capa de la atmósfera solar. Finalmente, la radiación solar se transporta por la heliosfera, la última capa atmosférica solar, 150 millones de kilómetros hasta dar con la superficie terrestre [2]. Considerando que el Sol emite la radiación como un cuerpo negro, según la Ley de Stefan-Boltzmann, ecuación (1.10), es decir $\varepsilon = 1$, la tasa de calor por radiación que emite a partir de su superficie es de aproximadamente $73,483.2 [kW/m^2]$, si se aproxima la temperatura solar a 6,000 [K]. Al multiplicar el valor anterior por el área de la fotosfera, se obtiene la emisión de la energía total a partir de esta capa solar, la cual tiene un valor de $3.8655 \times 10^{26} [W]$, haciendo uso de la ecuación (1.14) [7].

$$\dot{E} = \dot{Q}_{rad-solar} * 4\pi r_f^2 \quad (1.14)$$

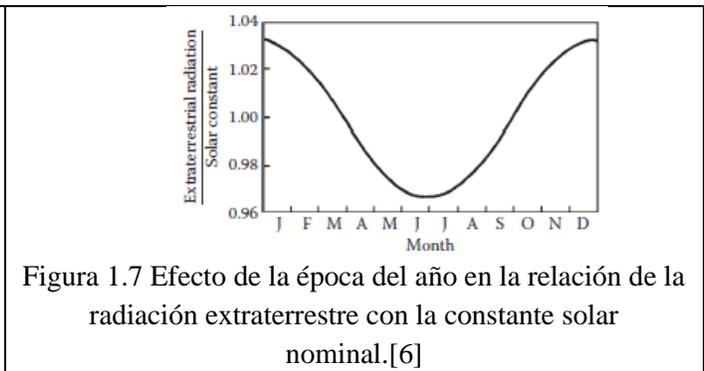
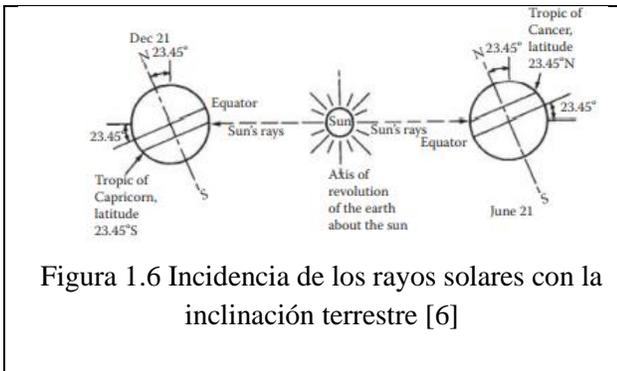
Esta energía se transmite de manera homogénea en todas direcciones, si se toma en cuenta el área de la esfera que se forma con la distancia promedio entre el Sol y la Tierra, y se utiliza como divisor para la energía total, entonces es posible conocer el flujo de radiación que alcanza a llegar a la Tierra. Aplicando la ecuación (1.15), se conoce que el valor de irradiación es de aproximadamente $I_0 = 1367[W/m^2]$. A este valor se le denomina como constante solar, la cual representa el aporte energético continuo que recibe la Tierra [7].

$$I_0 = \dot{E}/4\pi r_{d_0} \quad (1.15)$$

La cantidad de dicha constante solar que llega a la superficie terrestre se modifica por la oblicuidad, que es la inclinación del eje de rotación con respecto al plano de traslación de la Tierra, con 23.5° promedio de inclinación, las regiones que reciben mayor radiación son aquellas que se encuentran por encima y por debajo de los trópicos de Cáncer y Capricornio, respectivamente, figura 1.6; en otras palabras, la irradiación solar es función de la latitud en nuestro planeta [7]. Igualmente existe una dependencia de la irradiación solar de acuerdo con la época del año, pues con una órbita elíptica la distancia entre el Sol y la Tierra se modifica $\pm 1.7\%$ respecto al promedio, a partir de la ecuación (1.16) se determina la irradiación solar que entra a la atmósfera, denominada también como “Radiación Solar Extraterrestre” [1]. En la figura 1.7, se observa la relación de la irradiación solar (I) entre la constante solar (I_0) en función de los meses del año, de forma que entre mayor valor tenga esta relación, mayor radiación recibe la atmósfera terrestre en esa época del año.

$$I = I_0(r_{d_0}/r_d)^2 \quad (1.16)$$

Donde r_d es la distancia radial del Sol y la Tierra en un punto de su órbita elíptica, y r_{d_0} es la distancia radial promedio.



Ahora bien, de la irradiación solar que llega a la atmósfera terrestre, un tercio es reflejada al espacio exterior, efecto conocido como albedo. De los dos tercios restantes que ingresan, una fracción sufre atenuaciones por parte de las partículas atmosféricas, debido a que dichas partículas absorben el

flujo de radiación y también lo dispersan en direcciones diferentes a su ángulo de incidencia. Por lo tanto, es posible clasificar la radiación solar en directa y difusa, figura 1.8; ambas impactan al suelo y, de acuerdo con la reflectividad, parte de la radiación es reflejada con una menor longitud de onda [8]. La atmósfera se compone principalmente de nitrógeno (~78%), oxígeno (~21%) y argón (~1%); sin embargo, también se compone en pequeños porcentajes por gases de efecto invernadero como el vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, metano, y clorofluorocarbonos; dichos gases absorben los fotones de la radiación infrarroja reflejada por el suelo, de tal manera que incrementan su energía de rotación y vibración de moléculas, lo cual a su vez genera intercambios de energía cinética que derivan a un aumento de la temperatura atmosférica, a dicho fenómeno se le conoce como efecto invernadero [7].

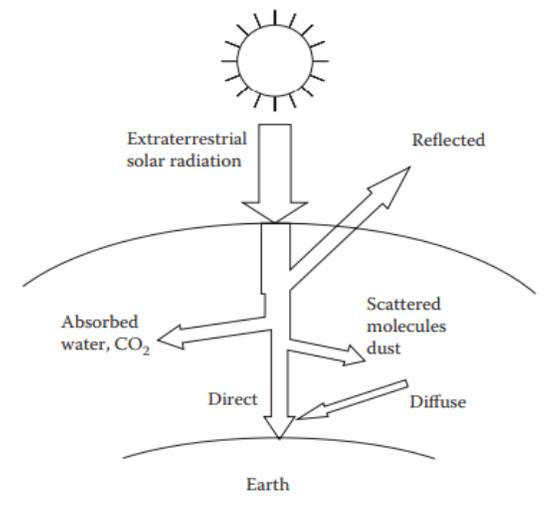


Figura 1.8 Radiación solar al entrar a la atmósfera terrestre [1].

1.4.3 La energía termo-solar, fuente de energía abundante y sustentable.

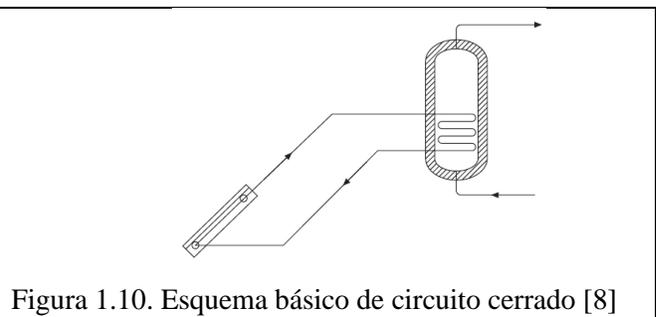
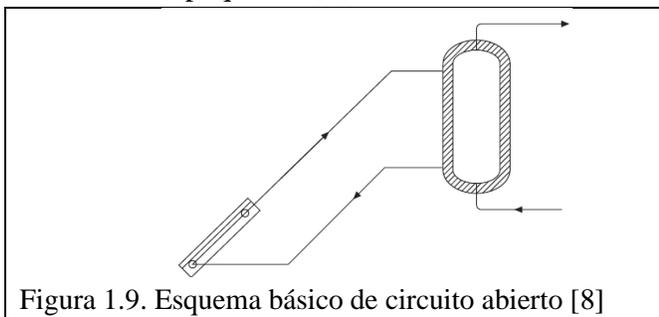
La energía solar se obtiene a partir de la radiación solar, tanto directa como difusa, la cual se transforma en energía eléctrica, o en energía térmica. Dichas transformaciones reciben el nombre de energía solar fotovoltaica y energía termo-solar, respectivamente. Ambos tipos de energía se pueden complementar entre sí, o bien, con otro tipo de energía renovable como la energía eólica, recibiendo en ambos casos el nombre de energía solar híbrida. Las principales ventajas de la energía solar es que es inagotable, totalmente renovable, y accesible para todo el mundo, esto debido a la naturaleza de su fuente; además, no presenta emisiones de dióxido de carbono, por lo que puede ser considerada como una energía limpia [9].

Los sistemas de energía termo-solar aprovechan los mecanismos de transferencia de calor con el fin de llevar a cabo el calentamiento de un fluido, en particular el agua. Están básicamente conformados por una captación solar, un fluido de calentamiento, un almacenamiento energético, un sistema de consumo, y un sistema auxiliar de calefacción, respectivamente. El aprovechamiento energético se obtiene de dos formas, la primera consiste en el uso de colectores solares directos, y la segunda, mediante

de sistemas más complejos conocidos en el idioma inglés como Concentrated Solar Power (CSP), los cuales detallan el uso de concentradores de radiación solar para mejorar la calidad de la energía.

El funcionamiento de los sistemas termo-solares inicia con el flujo del fluido de calentamiento por la captación solar, esto con el objetivo de adquirir energía térmica. La captación se fundamenta en el concepto de “cuerpo negro”, para la manipulación de la radiación solar; y del efecto invernadero, para disminuir las pérdidas de energía térmica en el flujo. Una vez calentado el fluido, éste es transportado hacia el sistema de almacenamiento, en donde la energía térmica es almacenada para finalmente llegar al sistema de consumo según la demanda que se presente. El sistema auxiliar de calefacción presenta una conexión paralela al sistema de consumo; hace uso de medios energéticos convencionales como el gas, la electricidad o el gasóleo para cumplir con las demandas energéticas en el momento que la energía térmica del almacenamiento sea insuficiente, dicha insuficiencia energética es causada por la fluctuación que presenta la radiación solar a lo largo de un intervalo de tiempo, ya sea durante un día, o durante el año.

Las instalaciones físicas se fundamentan en circuitos abiertos o circuitos cerrados, como se muestra en la figura 1.9 y 1.10, respectivamente. En el circuito abierto el fluido de calentamiento entra en contacto directo con el almacenamiento, y se convierte en el mismo fluido de consumo, prácticamente en su totalidad estos circuitos ocupan agua. El circuito cerrado se distingue por tener un intercambiador de calor, ya que se conforma por dos subsistemas, el primario, en donde el fluido de calentamiento pasa por la captación hasta el intercambiador, sin entrar en contacto directo con el fluido de consumo; y el secundario, el cual transporta el fluido de consumo a través del almacenamiento para la obtención de la energía térmica. En su mayoría los circuitos son de circulación forzada, es decir, son compuestos por una bomba de impulsión que hace circular el fluido por todo el circuito; sin embargo, también existen aquellos de circulación con termosifón, los cuales se fundamentan en la circulación natural del agua caliente en la parte superior y fría en la parte inferior, son implementados únicamente para sistemas termo-solares pequeños [8].



1.4.3.1 Concentradores y captadores solares.

El principio de un colector o captador solar es absorber la radiación solar, directa y difusa, esto mediante una superficie compuesta por uno o varios materiales de alta emisividad, con el objetivo de aproximarse a un cuerpo negro, haciendo uso de la absorptividad de este. Posteriormente, este canaliza el aporte energético mediante convección y conducción térmica, de manera que fluido de calentamiento

alcance una mayor temperatura, ya sea que este se encuentre estático o en movimiento. En la figura 1.11, se observa el funcionamiento de un sistema termosolar basado en un colector solar, con una configuración de circuito cerrado y circulación forzada [8].

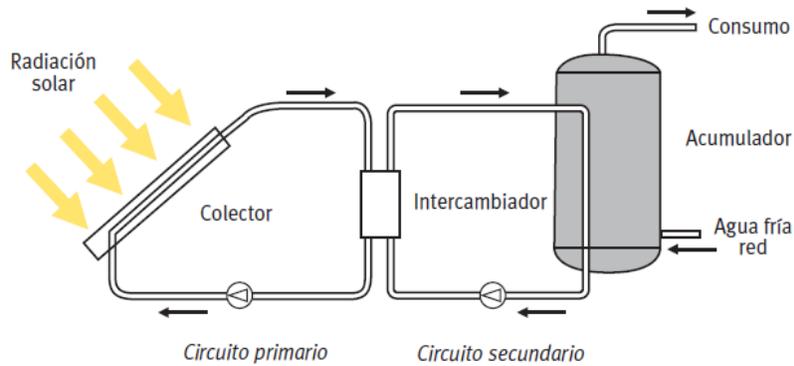
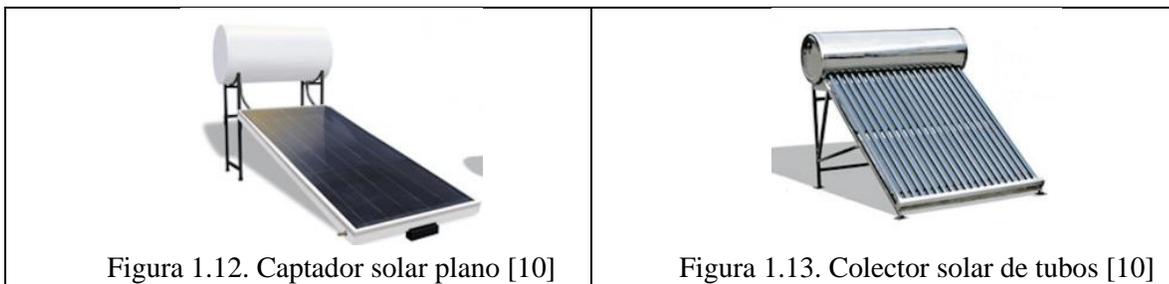


Figura 1.11. Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura con aplicación de agua caliente sanitaria [8].

Existen diferentes tipos de captadores solares, los más utilizados a nivel comercial son los captadores planos, figura 1.12, y colectores de tubos, figura 1.13, ambos destinados a la industria de Agua Caliente Sanitaria (ACS).



Un captador plano se simplifica como una caja hermética, figura 1.14. Inicia con una placa transparente protectora, generalmente hecha de vidrio, que permite el paso de los rayos solares hacia una placa absorbedora, e impide el escape de energía térmica, creando un efecto invernadero. La placa absorbedora, de apariencia negro mate en su mayoría, entra en contacto con una serie de tubos o enrejado, a través de los cuales pasa el agua para su calentamiento. Posteriormente, contiene un aislante térmico, el cual es sellado con una carcasa hecha de metal o plástico. Por último, el agua caliente es dirigida hacia el acumulador para su consumo.

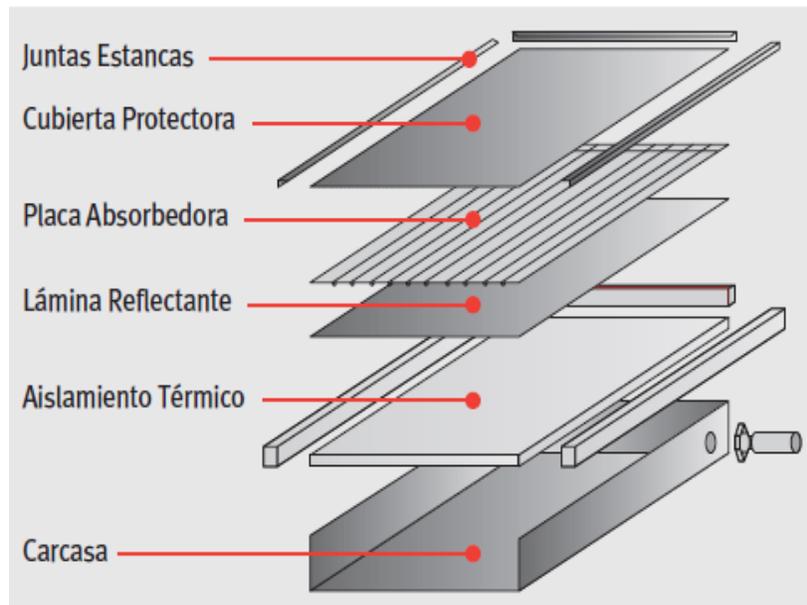


Figura 1.14. Configuración de un captador plano de tubos paralelo [8].

Un colector solar de tubos está configurado como un arreglo de tubos de cristal, cada elemento del arreglo consiste en dos tubos concéntricos con vacío entre ambos, lo cual evita las pérdidas por convección y genera el efecto invernadero. Este tipo de sistema se puede implementar como un circuito abierto o como un circuito cerrado, en el primero el agua circula por cada tubo interno y se almacena después en un termotanque, únicamente se pueden utilizar con un tinaco; mientras que, en el segundo también llamado colector de tubos con caloriducto (heat-pipe), el tubo interno metálico transfiere el calor hacia el agua del termotanque, figura 1.15 [10].

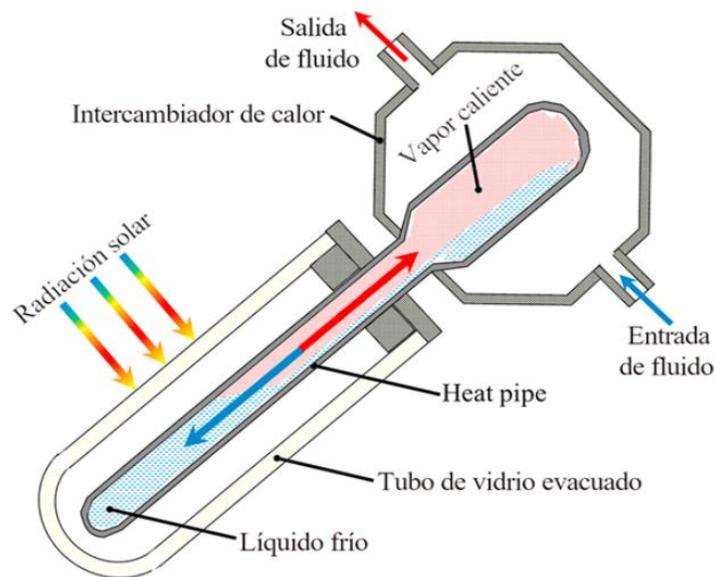
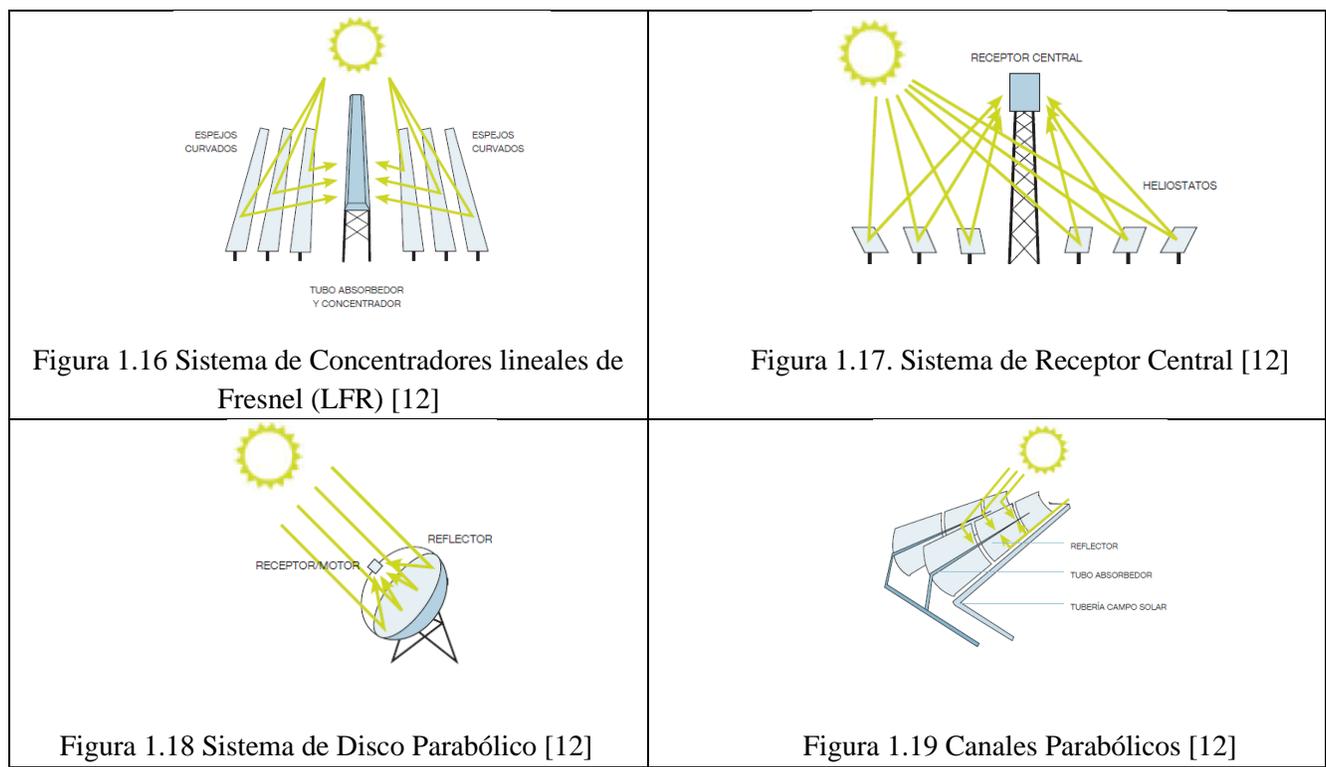


Figura 1.15. Vista transversal de un colector de tubos heat-pipe [11].

A diferencia de los captadores, el principio de un concentrador solar (CSP) es reflejar la radiación, únicamente directa, mediante una superficie compuesta por uno o varios materiales de baja emisividad, representando el concepto opuesto a un cuerpo negro, con el objetivo de hacer uso de la reflectividad presente para concentrar en un solo punto o línea los rayos solares. Posteriormente, se canaliza el aporte energético mediante convección y/o conducción térmica, de manera que el fluido de consumo aumente su temperatura y se lleve a cabo el proceso de consumo de energía térmica. Algunos tipos de concentradores solares cuentan con un sistema de orientación que sigue la trayectoria del Sol durante el día, dicha orientación perfila los concentradores hacia la posición requerida para captar la radiación solar directa. Debido a sus aplicaciones en la industria, el fluido de calentamiento, involucrado en la etapa de captación solar, no necesariamente es agua, es decir, por lo general los CSP funcionan como circuitos cerrados [8].

Existen cuatro tipos principales de sistemas de concentración solar en la industria de generación de electricidad: Sistemas de Concentradores Lineales de Fresnel (LFR), Sistemas de Receptor Central, Sistemas de Disco Parabólico y Sistemas de Canales Parabólicos, los cuales se pueden observar en las figuras 1.16 a la 1.19 [12].



Un LFR tiene reflectores casi planos que concentran la radiación en receptores lineales invertidos elevados, se clasifica como un sistema de concentración lineal; al igual que los canales parabólicos, la diferencia radica en la forma de los espejos reflectores, los cuales son cilindros parabólicos que

concentran la radiación en la línea focal de cada parábola. Los sistemas de concentración central son el disco parabólico y el receptor central, ambos reflejan la radiación hacia una sola región ubicada en el centro de estos sistemas. En el disco parabólico los espejos adquieren dicha forma para concentrar la radiación en el punto focal del disco. El receptor central es un conjunto circular de heliostatos que concentran la radiación en el punto más alto de una torre central [12].

1.4.3.2 Aplicaciones domésticas, industriales y de generación eléctrica.

En la tecnología actual referente a la energía termo-solar existen aplicaciones que son clasificadas por el nivel de temperatura que alcanzan en su etapa de captación solar, de tal forma que se dividen en sistemas de baja, media y alta temperatura [8].

Las tecnologías de baja temperatura son aquellas que no superan la temperatura de ebullición del agua, generalmente no mayor a los 100 °C, por lo cual, la mayoría está destinada a la industria ACS, en donde las temperaturas de trabajo se encuentran entre los 40 a 45 °C con el uso de los captadores planos o colectores de tubos. Estos sistemas consiguen cubrir la demanda de agua caliente a un porcentaje de 100% en temporadas de verano y mayores al 50% alrededor de todo el año [4]. En México, de acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018, el 43.5% de viviendas utiliza un calentador de agua, del cual se contabiliza que 2 millones son calentadores solares; en la figura 1.20, se puede observar el porcentaje de viviendas que utilizan captadores solares por cada tipo de región [13].

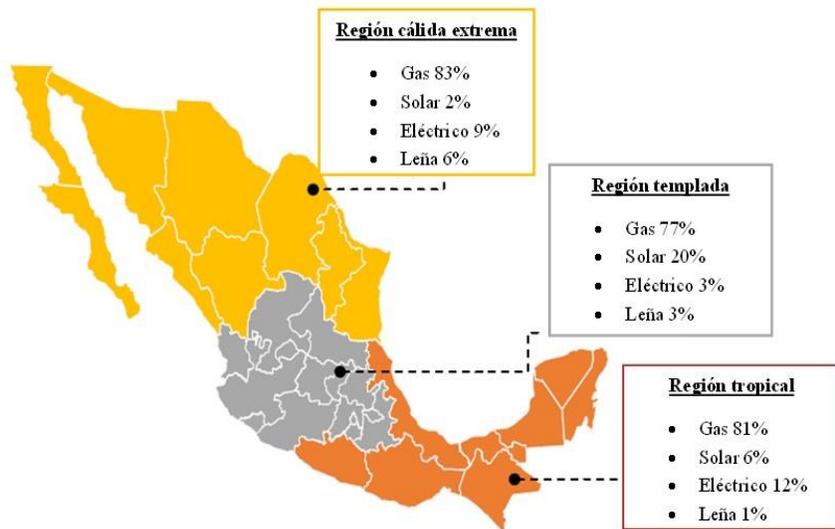
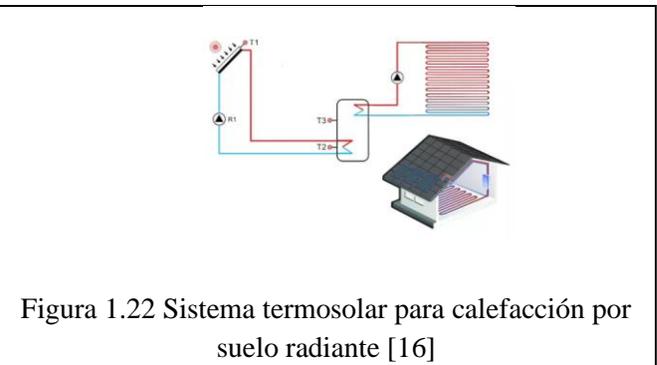
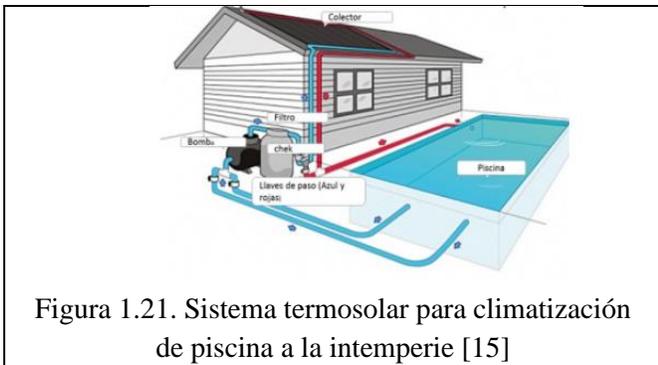


Figura 1.20 Distribución porcentual de viviendas que usan calentador de agua por regiones climáticas según tipo de calentador: modificación de ENCEVI (2018) [13].

Igualmente, las aplicaciones de baja temperatura se desarrollan en la climatización de piscinas y la calefacción de interiores, ya sea en ambientes de viviendas domésticas o edificios comerciales. Para

la climatización de piscinas es relativamente simple la implementación de un captador solar para mantener una temperatura estable en las piscinas, o albercas a la intemperie, debido a que se basan en circuitos abiertos, donde el almacenamiento térmico es propiamente el espacio por calentar y, en su mayoría, no requieren un sistema de calefacción auxiliar, lo cual también representa un sistema económico de emplear, figura 1.21. Para las instalaciones cubiertas se utiliza un circuito cerrado, ya que permite la compatibilidad con otras aplicaciones, como el ACS, además de que requieren de un sistema auxiliar de calefacción, por lo tanto, son sistemas un poco más complejos, y algo menos económicos. La temperatura por mantener en las piscinas es en promedio 30°C, esto permite reducir el costo de los captadores solares, sin afectar significativamente su rendimiento, o también, como se comentó previamente, permite aprovechar la energía térmica restante para la calefacción de interiores o el agua sanitaria [8].

La calefacción de interiores tiene dos vertientes de aplicación, la pasiva y la activa. En el primer caso, el proceso consiste en mantener la temperatura del inmueble mediante un diseño adecuado del espacio disponible, junto con el uso de materiales compuestos en la construcción, de tal forma que la radiación solar sea almacenada en la edificación, y la climatización se lleve a cabo sin recurrir a los sistemas tradicionales. En la calefacción activa se utiliza un sistema de captación termosolar para la adquisición de energía térmica, ya sea mediante un circuito abierto o cerrado, dicha energía se libera en el interior del inmueble al hacer circular el fluido de calentamiento por un sistema de suelo radiante, figura 1.22 [14].



Las tecnologías de media y alta temperatura están destinadas a la industria de generación de energía eléctrica, conocidas mejor como centrales de generación termosolar, su rango de operación es de 100 a 2000 °C, sin embargo, hasta los 250 °C se considera tecnología de media temperatura. Debido a que se utiliza agua como fluido de calentamiento, en sistemas de temperaturas superiores se utilizan aceites o soluciones salinas para absorber la energía térmica. No obstante, todas las plantas de generación de este tipo requieren un sistema auxiliar de calefacción a base de gas [8].

Las centrales de generación termo-solar producen electricidad de manera similar a las centrales térmicas convencionales, ya que ambas hacen uso del vapor sobrecalentado para accionar una turbina generadora, es decir, se lleva a cabo un proceso de transformación de energía térmica a mecánica, y

finalmente, a eléctrica; las diferencias radican en la etapa de adquisición de energía térmica. En las centrales termosolares con tecnología de media temperatura se aplican sistemas de concentradores lineales de Fresnel y, en algunos casos, con sistemas de receptor central. Mientras que, en las centrales con tecnología de alta temperatura, se aplican sistemas de canales parabólicos, sistemas de disco parabólico, y receptores centrales, en donde los fluidos de calentamiento alcanzan temperaturas de 400 °C, 750°C y 1000 °C, respectivamente. Por consiguiente, para llevar a cabo el mismo proceso se utilizan intercambiadores y almacenamientos térmicos [12].

De acuerdo con la literatura técnicas sobre energía, el 90% de las plantas termo-solares más grandes del mundo se reparten entre España y Estados Unidos. Con una capacidad de producción acumulada de 2.3 GW, Estados Unidos lidera el mercado mundial con la planta termo-solar Ivanpah, la cual hace uso de tres sistemas de receptores centrales en el desierto de Nevada y California, para una capacidad de producción individual de 392 MW, figura 1.23. Ahora bien, con una capacidad acumulada 1.7 GW, España lidera el mercado europeo con la Plataforma Solar Solaben, la cual utiliza cuatro plantas de canales parabólicos en Cáceres Extremadura, para una capacidad de producción individual de 200 MW, figura 1.24 [17].



Figura 1.23. Ivanpah, huertos solares en el desierto de Mojave, Estados Unidos [17]



Figura 1.24. Plataforma Solar de Extremadura Solaben, España [17]

1.4.4 Limitaciones y desventajas de los sistemas termo-solares

La principal desventaja en los sistemas de energía solar es la intermitencia que presenta su conversión de energía, la cual se debe a la naturaleza de la radiación solar. De acuerdo con lo descrito en la sección 1.4.2, la oblicuidad, el proceso de traslación, las condiciones climáticas, y claramente, el proceso de rotación, son los factores que influyen sobre la radiación solar y generan dicha intermitencia energética, ya que modifican constantemente la radiación directa y difusa que incide en la etapa de captación solar de los sistemas termo-solares, sin importar el tipo de aplicación. Particularmente, las malas condiciones climáticas limitan mayormente a los sistemas de concentración solar, debido a una reducción en la radiación directa, la cual se transforma a radiación difusa en los climas nublados.

La segunda desventaja es la baja densidad del flujo que presenta la energía solar, de tal manera que para un aprovechamiento energético rentable a gran escala se necesitan instalaciones que abarquen mucha área de captación, sin embargo, entre mayor área abarque el sistema termo-solar, mayor será su costo de inversión inicial. Teóricamente, para un área de captación de 10 [m²], la eficiencia teórica del

proceso de adquisición puede llegar al 70%, y su conversión energética final, es decir su aprovechamiento final, a un 30%, esto durante un día nublado al momento de tener la máxima exposición solar. En la práctica, los porcentajes de conversión se ven reducidos a un 25% de utilización, ocasionado nuevamente por las condiciones climáticas, el curso natural de la irradiación solar, la eficiencia de los sistemas físicos, las posibles pérdidas de energía térmica, entre muchos otros factores.

Las instalaciones de los sistemas CSP son limitadas por las condiciones naturales que existen en las zonas de alta insolación, pues la cantidad media de energía disponible en un plano horizontal es mayor en las latitudes de 25° al norte y sur del ecuador, en dichas latitudes se encuentran áreas desérticas planas con poca o nula presencia de cuerpos de agua superficiales, por lo cual se dificulta llevar a cabo el proceso de enfriamiento involucrado en las centrales de generación termo-solar. Sin mencionar que el transporte de energía hacia las regiones industrializadas, que se encuentran remotas del desierto en cuestión, implican pérdidas energéticas y un aumento en su inversión económica. Yogi Goswami muestra el potencial de energía eléctrica que presentan las zonas desérticas con mayor irradiación solar en el mundo, algunas de estas se exponen en la tabla 1.3, con una eficiencia máxima en la práctica de 25% [1].

Tabla 1.3. Energía solar-eléctrica obtenida de zonas con alta insolación [1].

Zona desértica	Área Nominal [km^2]	Flujo de Energía Térmica Nominal [$GW h/km^2$]	Energía eléctrica obtenida con un 25% de eficiencia [$GW h/año$]
Norte de África	7,770,000	2300	670,000,000
Península de Arabia	1,300,000	2500	244,000,000
Vizcaíno, Baja California	15,500	2200	2,100,000
Oeste y Centro de Australia	1,550,000	2000	194,000,000

Particularmente, para los sistemas destinados a la industria ACS, el diseño del captador y el almacenador debe ir a la par, pues si el almacenador se encuentra sobredimensionado, las temperaturas para un adecuado funcionamiento no son alcanzadas y, en el caso contrario, si el almacenador se encuentra en dimensiones pequeñas de acuerdo con la aplicación, la energía adquirida se desperdicia. La limitante más significativa se encuentra en la altura del tanque de almacenamiento, puesto que entre mayor sea este valor, mayor es el diferencial de temperatura, por lo cual la capacidad de resguardar energía térmica aumenta igualmente. Por último, para los tanques almacenadores se debe seleccionar un solo tipo de material, con el objetivo de reducir las corrosiones generadas por agua, además de la creación de pares galvánicos [8].

1.4.5 Almacenamiento de energía térmica, retos y oportunidades.

El almacenamiento térmico o Thermal Energy Storage (TES) en idioma inglés es uno de los sistemas de almacenamiento de energía más económicos que existe, esto si se consideran las múltiples funciones en las que es implementado en aplicaciones de energía termo-solar. Además, dentro de la industria química y la industria de alimentos, es recurrente el uso de estos sistemas. Su objetivo es reducir la intermitencia presente en los sistemas termo-solares, de tal forma que se logren cubrir las necesidades energéticas, al consumir energía térmica almacenada en un momento diferente al de su generación. Al igual que en las aplicaciones de los sistemas termo-solares, el TES se puede clasificar según sus rangos de temperatura, de manera que existen aplicaciones para temperaturas a nivel bajo, de 40 °C a 120 °C, y de temperaturas para nivel medio-alto, de 120 °C a 1000 °C. Dentro de cada nivel se establecen diferentes técnicas de almacenamiento de energía térmica, las cuales se dividen en el resguardo del calor sensible, el calor latente, o mediante calor termoquímico.

Actualmente, las aplicaciones más comunes se dan con técnicas para almacenar calor sensible, dicha técnica consiste en acumular la energía térmica en un cuerpo sólido o líquido, cuya temperatura se incrementa con el paso del tiempo. En este caso, el calor específico del cuerpo de almacenamiento tiene un gran impacto, ya que entre mayor sea su valor, mayor energía térmica será capaz de almacenar sin incrementar su temperatura. El agua tiene un calor específico alto, cuyo calor sensible puede ser aprovechado en un rango de 0 °C a 100 °C. En un almacenamiento de nivel bajo, el agua precalentada se resguarda en tanques o torres de almacenamiento para su posterior consumo, unos ejemplos se tienen en Brest, Francia y Vojens, Dinamarca, cuyas torres tienen una capacidad de 1,000 y 200,000 metros cúbicos de agua, respectivamente [18].

Existen también los sistemas de almacenamiento de calor geotérmico o por sus siglas en inglés (GHSS), figura 1.25, los cuales almacenan la energía térmica dentro del subsuelo, la cantidad de almacenamiento depende de las condiciones de este, ya sea de roca nativa, grava, arcilla, entre otros. Se aplica para tiempos de almacenaje más prolongados, donde el calor sensible es adquirido en una estación del año con mucha oferta energética, en el verano, y es aprovechado en una estación con mucha demanda energética, en el invierno; el flujo se realiza mediante bombas de calor, dependiendo de las temperaturas que alcance el sistema, ya que se puede aplicar para niveles tanto bajos como medios de temperatura.

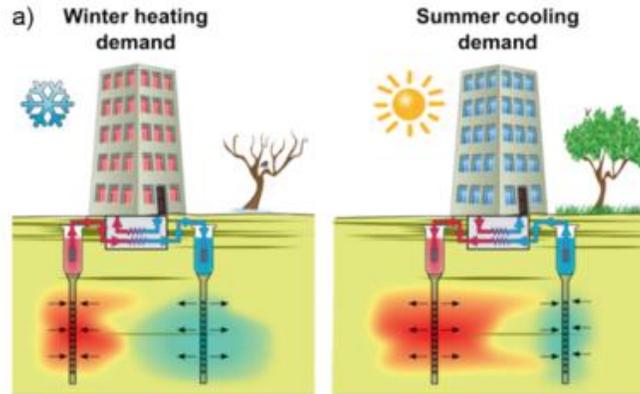


Figura 1.25. Funcionamiento básico del almacenamiento de energía térmica en acuíferos [19].

Igualmente, para almacenar calor sensible, pero a un nivel de temperatura medio-alto, la aplicación se da en las centrales de generación termo-solar, dentro de las cuales el aprovechamiento energético puede otorgarse de dos formas, durante un corto o un mediano plazo de tiempo. El primero se aplica durante un intervalo de 30 minutos aproximadamente. Lo anterior en presencia de un clima nublado, donde se utiliza la energía térmica almacenada como un amortiguador térmico sobre la turbina de generación, lo cual previene un proceso no estacionario, es decir mantiene constante la producción de electricidad. El segundo se aplica por un intervalo mayor a un par de horas, ya sea para prolongar la producción de electricidad en periodos nocturnos, donde la demanda en hogares incrementa, o para producir electricidad únicamente en los momentos de mayor demanda eléctrica. Cabe destacar que el 80% de estos sistemas de almacenamiento consisten en dos tanques que resguardan sal fundida, uno caliente y otro frío, los cuales hacen uso de un intercambiador de energía térmica, figura 1.26. Un ejemplo es la planta generación termo-solar Andasol, la cual cuenta con un almacenamiento conformado por dos tanques circulares de 36 [m] de diámetro y 14 [m] de altura, que contienen 28,000 toneladas de sales de nitrato fundidas entre 293 y 393 [°C], almacenan 1010 MWh, lo que permite una potencia eléctrica equivalente de 50 MW durante 7.5 horas. El otro 20% corresponde a un solo tanque de almacenamiento, cuyo diseño es prácticamente idéntico al del intercambiador mostrado en la figura 1.26 [18].

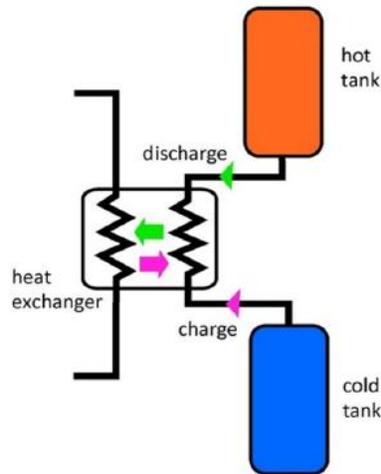


Figura 1.26 Principio del sistema de almacenamiento de calor sensible con dos tanques [18].

Retos y oportunidades

Los desafíos dentro del almacenamiento térmico surgen en el resguardo de calor latente, en donde la energía térmica se almacena o se libera cuando un material se ve forzado a un cambio de fase. En la construcción de edificios se han desarrollado, desde el año 2007, la implementación de materiales con cambios de fase o Phase-Change Material (PCM) en idioma inglés dentro de las paredes, los cuales sirven para incrementar su inercia térmica, de tal forma que mayor energía es almacenada dentro de un mismo espacio volumétrico, en otras palabras, un espacio con 2.5 cm de sales hidratadas PCM es capaz de resguardar la misma cantidad de energía que un espacio de 15 cm hecho de concreto, lo cual se resume en un beneficio directo para la industria de calefacción de interiores, ya que los materiales PCM mantienen la suficiente temperatura ambiental para evitar condensaciones, lo que deriva en un incremento de la vida útil de todo el edificio; así mismo, proporcionan una mayor compatibilidad con los sistemas de agua caliente sanitaria. Dados los beneficios, estos tipos de materiales se buscan implementar en aplicaciones para un nivel medio-alto de temperatura, sin embargo, existen limitaciones tecnológicas y criterios importantes a considerar como el costo adecuado del PCM para la aplicación, la degradación del rendimiento del material, las corrosiones del material con el contenedor de almacenamiento, y la recuperación de potencia, por lo que no existen aplicaciones a estos niveles de temperatura. No obstante, actualmente se desarrollan metodologías de experimentación y modelado para su implementación industrial [18].

Por otra parte, los retos que enfrenta la industria de la energía termo-solar se han orientado a un aumento de instalación industrial, puesto que la capacidad instalada actual es reducida en comparación a su potencial. El primer desafío es el desarrollo tecnológico de los sistemas de captación y almacenamiento, principalmente, mediante la investigación de materiales, como los ya mencionados PCM, los cuales pueden otorgar una mayor eficiencia en la adquisición de energía térmica, al igual que

una mayor eficiencia termodinámica reduciéndose así el impacto de la intermitencia. El segundo reto va de la mano con dicha investigación, se trata sobre innovar la adaptabilidad de esta tecnología para las distintas ubicaciones industriales, junto con mejoras en el proceso de fabricación de colectores, que deriven en una disminución de peso y costo del producto; si se considera que entre el 50% al 70 % de la inversión total del sistema termosolar recae en el costo de sus colectores, entonces habrá un crecimiento del mercado dado el claro beneficio en el costo de inversión inicial. En resumen, se requiere una inversión en el sector de “Investigación y Desarrollo (I+D)” para conseguir superar dichos desafíos, no obstante, la crisis relacionada con al COVID-19 da como resultado un desapego de parte del sector privado, con lo cual todo apoyo económico y promoción de programas políticos que incentiven a este sector recae en las manos de los gobiernos con las economías más importantes. Aún con esta situación, la energía termo-solar se encuentra en crecimiento dentro del sector económico, siendo una alternativa con tendencia progresiva en procesos industriales como la producción de alimentos; las industrias mineras; textiles; farmacéuticas; entre otras [11].

1.5 Propuesta de estudio.

México es un país con una buena ubicación geográfica para el desarrollo de energía termosolar, puesto que contiene zonas de alta insolación, como se menciona en la tabla 1.3, además de valores significativos de irradiación promedio por día, tabla 1.4; en esta última tabla la radiación solar incidente con mayor relevancia para el estudio de colectores y concentradores solares es la Irradiación Global Horizontal (GHI) y la Irradiación Normal Directa (DNI). El parámetro GHI representa la radiación solar de onda corta que recibe una superficie horizontal, mientras que el parámetro DNI representa la radiación solar de onda corta que recibe una superficie en posición normal al sol [20].

Al observar las figuras 1.27 y 1.28, relacionadas con los parámetros de irradiación ya mencionados, es factible concluir que la región de México tiene un potencial de desarrollo de energía termo-solar equiparable al de Estados Unidos y superior al de España, únicamente basándose en la cantidad promedio de irradiación global horizontal y normal directa que recibe, tanto de manera diaria como anual. Dado el constante crecimiento de esta alternativa energética, y la ubicación favorable de la región, es necesaria la inmersión e inversión del país en dicha tecnología.

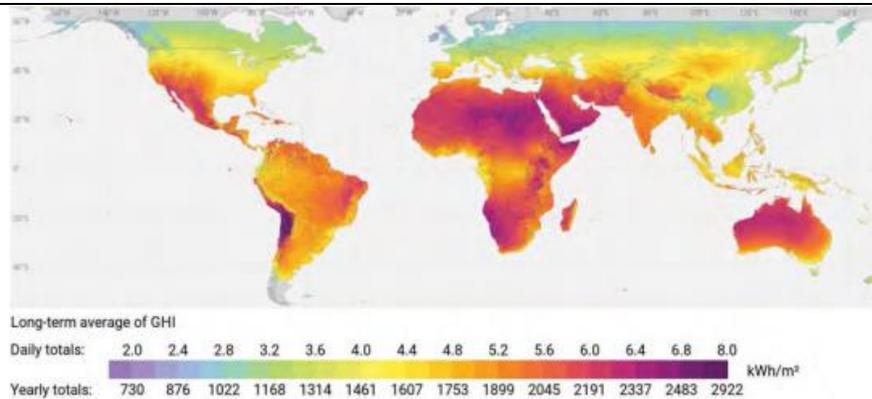


Figura 1.27. Irradiación Global Horizontal: Promedio anual a largo plazo de resúmenes diarios/anuales.[20]

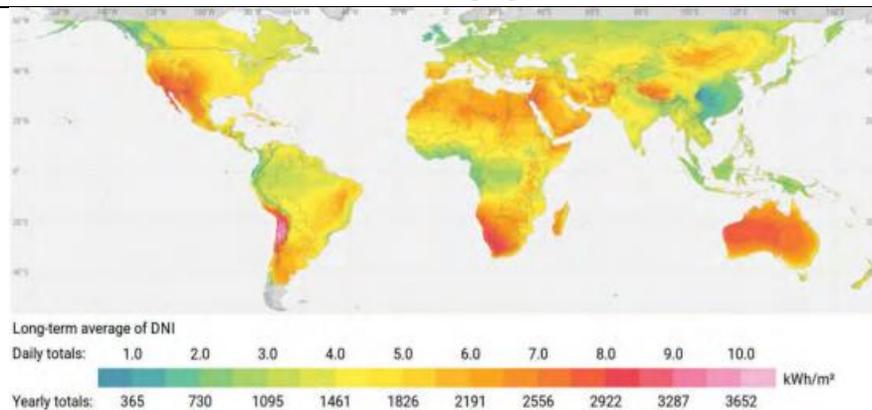


Figura 1.28 Irradiación Normal Directa: Promedio anual a largo plazo de resúmenes diarios/anuales.[20]

Tabla 1.4 Irradiación promedio por día en la región de México [21]

Tipo de Irradiación	Rango de valores promedio por día
<i>Normal Directa</i>	3.37-8.06 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Global horizontal</i>	4.61-6.29 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Difusa horizontal</i>	1.16-2.35 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Global inclinada</i>	4.74-7.03 [<i>kWh/m²</i>]

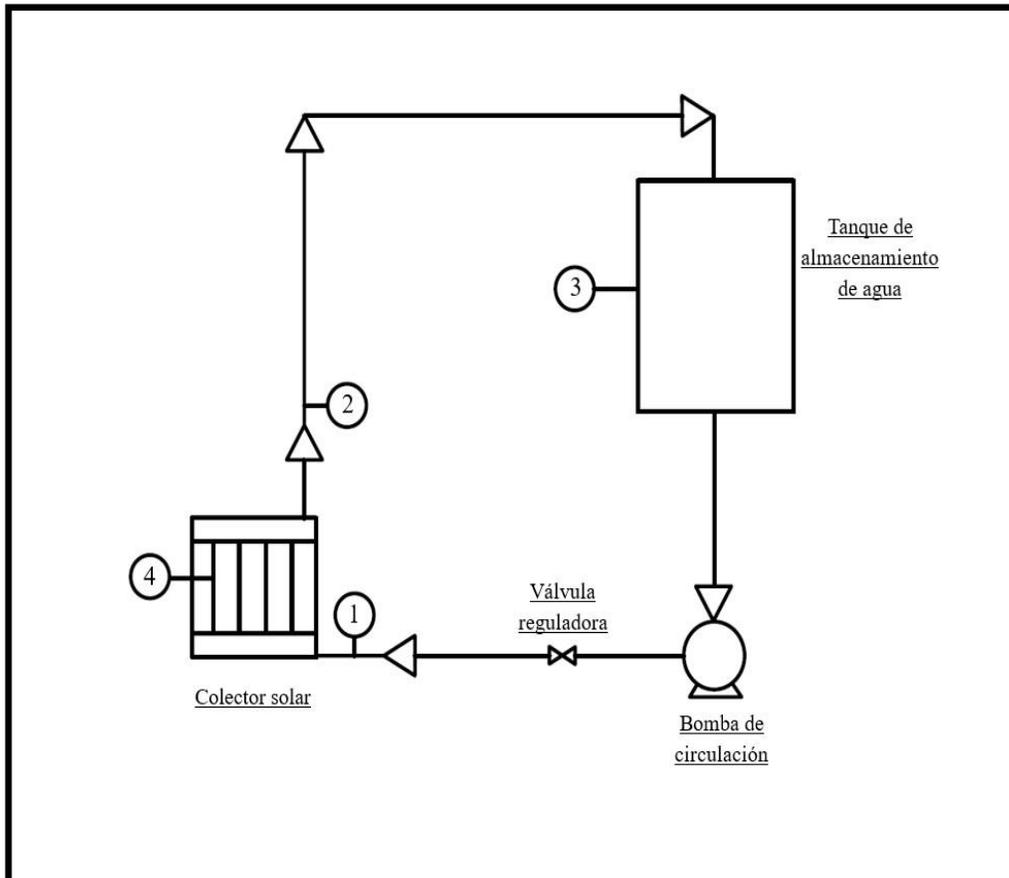
Contrera et al. (2022) señalan que en México “se estimó un consumo total de energía en el sector residencial de 790 [PJ] para 2018, del cual el 76% corresponde a energía térmica, y el 24% restante a energía eléctrica”. De este porcentaje destinado a la energía térmica, el 19% corresponde al calentamiento de agua, lo equivalente a 120 [PJ] anuales del consumo energético nacional, dentro del cual 1.92 millones de viviendas en el país utilizan sistemas de colectores solares, ya sea de manera exclusiva o complementaria con sistemas de Gas LP. Cabe destacar que el 57% de viviendas nacionales no utiliza ningún tipo de calentador de agua para realizar el mismo proceso [22].

Con la utilidad actual de la energía termo-solar, tanto activa como pasiva, el aprovechamiento energético que otorgan los sistemas termo-solares se ha vuelto un tema recurrente dada su relevancia, por lo que la propuesta de estudio tiene como base el desarrollo de un esquema experimental útil para la determinación de la eficiencia energética presente en un calentador solar comercial, destinado a la climatización de piscinas, a partir de la irradiación existente durante un intervalo de tiempo, en el cuál dicha irradiación sea óptima para un mejor aprovechamiento de energía.

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Tizayuca, Hidalgo dentro de los Estados Unidos Mexicanos. Durante la época de primavera, específicamente del 25 al 29 de marzo del año 2024. En la tabla 1.5 se presentan los valores promedio de irradiación que llegan a la región de experimentación.

Tabla 1.5 Irradiación promedio en la región de Tizayuca, México [21]

Tipo de Irradiación	Valores promedio por día	Valores promedio por año
<i>Normal Directa</i>	6.192 [<i>kWh/m²</i>]	2260.0 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Global horizontal</i>	6.091 [<i>kWh/m²</i>]	2223.1 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Difusa horizontal</i>	1.958 [<i>kWh/m²</i>]	714.8 [<i>kWh/m²</i>]
<i>Global inclinada</i>	6.500 [<i>kWh/m²</i>]	2372.6 [<i>kWh/m²</i>]



CAPÍTULO 2

Planteamiento del problema

2.1 Modelo de estudio

El modelo de estudio se enfocó en determinar el mejor aprovechamiento energético que presenta un sistema termosolar de circuito abierto y circulación forzada cuando es sometido a diferentes flujos de masa, por lo que se cuantificó la cantidad de radiación solar que es transformada a energía térmica mediante el aumento de temperatura en un volumen de control, durante un intervalo de tiempo específico.

2.1.1 Esquema del sistema termosolar

En la figura 2.1 se muestra el esquema del sistema termosolar, en el cual se desarrollaron los cuatro experimentos, dicho sistema consiste en cuatro elementos fundamentales: el colector solar, la válvula reguladora, la bomba de circulación y el tanque de almacenamiento.

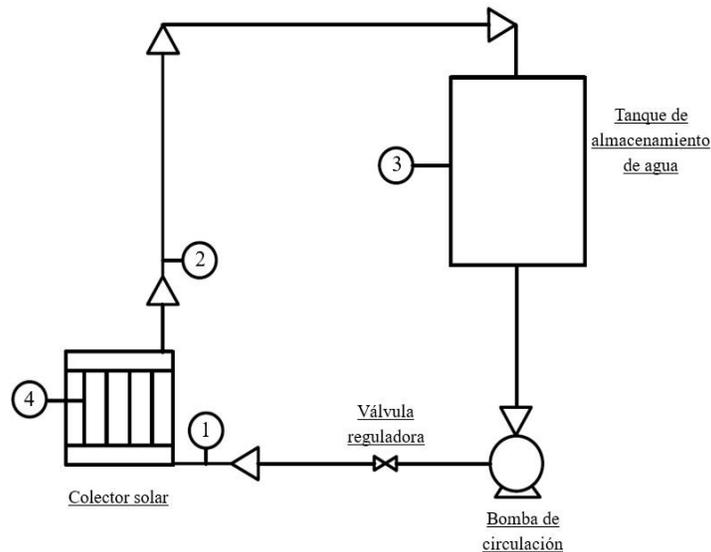


Figura 2.1. Diagrama del sistema termosolar experimental

2.1.2 Balance de energía térmica en el sistema propuesto

Las siguientes ecuaciones describen el balance de energía para cada uno de los cuatro experimentos realizados, esto con el fin de cuantificar el aprovechamiento energético del sistema en estudio. En la figura (2.1), se observa el diagrama del sistema experimental, en dónde existe una circulación continua del fluido de calentamiento. Se analizó a dicho sistema cómo un volumen de control cerrado, en vista de que no hay un incremento o pérdida de masa durante la circulación del fluido. Dado que el estudio se enfocó en la transformación de energía térmica, el balance energético se fundamenta en la ecuación (1.2), considerando que la generación de energía dentro del sistema es inexistente, y que

el estudio involucra cálculos sobre la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo (\dot{Q}); el análisis energético del sistema termosolar parte de la ecuación (2.1).

$$\Delta\dot{E}_t = \dot{Q}_e - \dot{Q}_{sa} \quad (2.1)$$

En esta expresión, \dot{Q}_e representa el flujo de calor que ingresa al sistema termosolar, \dot{Q}_{sa} es el flujo de calor que sale del sistema, y $\Delta\dot{E}_t$ define la razón de cambio de energía interna en dicho sistema (medidos todos en Watts). El flujo de energía que ingresa al sistema se obtuvo a partir de la radiación solar absorbida por el área superficial del colector solar, ecuación (2.2). Por lo mismo, el balance de energía en la superficie del colector corresponde a la ecuación (1.7), sin embargo, al involucrar el movimiento de un fluido la conductividad es despreciable, es decir, idealmente en su totalidad la energía se transfiere a través de la superficie mediante convección. De tal forma que el análisis energético del área superficial del colector solar consiste en un proceso estacionario de transferencia de calor dado en los términos de la ecuación (2.3).

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{rad} \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{conv} \quad (2.3)$$

La absorptividad promedio de la superficie del colector solar es equivalente a su emisividad promedio, con lo que se puede cuantificar la cantidad de irradiación contenida en la superficie mediante la ecuación (1.10), tomando en cuenta que el material es un plástico de color negro, se estableció la emisividad del colector (ε_c) a un valor de 0.95, de acuerdo con la tabla 1.2; también se calculó el área superficial a un valor de 1.44 [m²]. Al sustituir estos valores junto con la constante de Stefan-Boltzmann (σ) en la ecuación (1.10), los valores de flujo de calor por radiación se obtuvieron a partir de la ecuación (2.4), la cual depende únicamente de la temperatura superficial del colector solar.

$$\dot{Q}_{rad} = 77.70 \times 10^{-9} \left[\frac{W}{K^4} \right] [T_s^4] \quad (2.4)$$

No obstante, en la expresión (2.3) no se toma en cuenta las pérdidas de energía por las condiciones ambientales en la etapa de captación solar. Por lo tanto, se utiliza la expresión (1.12) para calcular la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie con los alrededores. En este trabajo, se presentan estos cálculos bajo el nombre de flujos de calor perdido por radiación (\dot{Q}_{PR}), con el fin de simplificar el concepto, además de hacer una distinción con los flujos de calor por radiación (\dot{Q}_{rad}). Igualmente, se sustituyeron los valores de emisividad, área superficial, y la constante de Stefan-Boltzmann (σ), dando lugar a la expresión (2.5).

$$\dot{Q}_{PR} = 77.70 \times 10^{-9} \left[\frac{W}{K^4} \right] [T_s^4 - T_{amb}^4] \quad (2.5)$$

Ahora bien, el flujo de calor por convección (\dot{Q}_{conv}) se obtuvo de forma paralela mediante la ecuación (1.6), en términos del flujo másico y su diferencia de temperaturas, ya que el propio colector

solar se analizó como un volumen de control con una sola entrada de flujo estacionario, y una sola salida del mismo flujo, es decir, toda la masa que ingresa al colector, sale de este mismo, por consiguiente la transferencia de calor se refleja en un cambio de temperatura del agua de la entrada y la salida del colector. Sustituyendo el valor del calor específico a presión constante del agua ($c_{p_{agua}}$), las magnitudes del flujo de calor por convección se calcularon con la ecuación (2.6).

$$\dot{Q}_{conv} = 4,180 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \dot{m} \Delta T \quad (2.6)$$

$$\Delta T = [T_{sa} - T_e] \quad (2.7)$$

Para este caso, T_e y T_{sa} representan las temperaturas a la entrada y a la salida de colector solar, así mismo, ΔT define la diferencia de temperatura entre estas, respectivamente (todas evaluadas en grados Kelvin). El aprovechamiento de la energía térmica se obtuvo a partir del cambio energético total (ΔE), que se evalúa en el tanque de almacenamiento. Se analizó al tanque como un volumen de control con flujo estacionario, en donde no hay interacción de trabajo, ni generación de energía térmica, por lo cual nuevamente se puede aplicar la ecuación (1.2). Aunque, la masa de agua contenida en el volumen de control es mucho mayor a la masa que ingresa o sale del mismo, durante todo el periodo de experimentación, la velocidad en el flujo másico de entrada es igual a la velocidad del flujo másico de salida, y puede ser modificada significativamente al ser regulada por una válvula de compuerta. Estos hechos repercuten en un incremento de temperatura del sistema, donde la transferencia de calor en el colector solar es en estado estacionario, y la acumulación de energía en el tanque es un proceso cuasi-estacionario (con cambios pequeños de temperatura a la largo del tiempo), el cual cuantifica cuanta energía se recupera durante todo el tiempo.

Dado que en el tanque tampoco se presenta otra fase del fluido incompresible, entonces el cambio energético total se atribuyó a un cambio en su energía interna, ecuación (1.1), lo que a su vez representa el calor sensible del tanque de almacenamiento, ecuación (2.8).

$$\Delta E = \Delta U = Q_s \quad (2.8)$$

El calor sensible se obtuvo con la expresión (2.9), sin embargo, la masa se determinó mediante la relación que guarda con la densidad, en otras palabras, se define a la masa como un producto del volumen de almacenamiento por la densidad del agua. Considerando las temperaturas de inicio (T_i) y fin (T_f) del experimento, las energías internas involucradas se calcularon con las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente.

$$Q_s = m c_p \Delta T \quad (2.9)$$

$$U_i = \rho_a c_{p_{agua}} V T_i \quad (2.10)$$

$$U_f = \rho_a c_{p_{agua}} V T_f \quad (2.11)$$

El volumen de almacenamiento se calculó con el radio de la circunferencia interna del tanque (r), y la altura de la columna de agua dentro del tanque (L), ecuación (2.12), estableciendo un valor de 0.178 [m^3]. Al sustituir este valor junto con las constantes de densidad (ρ_a), y calor específico ($c_{p_{agua}}$) en la

ecuación (2.9), los valores del cambio en la energía interna de cada experimento se calcularon con la expresión (2.13), la cuál queda definida en términos de la diferencia de temperaturas.

$$V = \pi r^2 L \quad (2.12)$$

$$Q_s = 741.06 \times 10^3 \left[\frac{J}{^\circ C} \right] (T_f - T_i) \quad (2.13)$$

Finalmente, se obtuvo la razón del cambio de energía del tanque al dividir el calor sensible de cada experimento entre el intervalo de tiempo definido (Δt), utilizando la ecuación (2.14). A estos valores se les denomina flujos de calor neto del sistema (\dot{Q}_n), y representan el cambio en la tasa de energía térmica del sistema termo-solar ($\Delta \dot{E}_t$) en el análisis energético correspondiente, ecuación (2.15).

$$\dot{Q}_n = \frac{Q_s}{\Delta t} = \frac{U_f - U_i}{t_f - t_i} \quad (2.14)$$

$$\Delta \dot{E}_t = \dot{Q}_n \quad (2.15)$$

Entonces, el análisis energético del sistema termo-solar, ecuación (2.1), queda definido en términos de la siguiente igualdad:

$$\dot{Q}_n = (\dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{PR}) - \dot{Q}_{sa} = \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{sa} \quad (2.16)$$

Donde el flujo de calor que sale del sistema termosolar (\dot{Q}_{sa}) equivale a las pérdidas de energía térmica que el sistema tiene con el ambiente, aquellas que no pertenecen a la etapa de captación solar, mayormente ocasionadas por convección. Si consideramos el transporte del flujo y su almacenamiento como secciones adiabáticas, el flujo de calor de salida es despreciable, por este motivo la ecuación (2.16) se reformula para describir el proceso ideal de transferencia de calor en el sistema termo-solar, resultando en la ecuación (2.17).

$$\dot{Q}_n = \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{PR} = \dot{Q}_{conv} \quad (2.17)$$

2.2 Variables de estudio, datos por recabar, y cálculo de la ganancia de energía.

2.2.1 Definición de las variables que intervienen en el modelo de estudio.

Analizando la ecuación (2.16) referente al análisis energético del sistema termosolar, se puede observar que la mayoría de los flujos de calor involucrados son dependientes de diferentes temperaturas, aquellas que se encuentran dentro de dicho sistema, e intervienen en el modelo de estudio de manera directa se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Temperaturas variables en el modelo de estudio

<i>Temperatura Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Flujo de calor asociado</i>
T_s	<i>Temperatura superficial del colector solar</i>	$\dot{Q}_{rad}, \dot{Q}_{PR}$
T_{amb}	<i>Temperatura ambiente en el experimento</i>	\dot{Q}_{PR}
T_e	<i>Temperatura del fluido en la entrada del colector solar</i>	\dot{Q}_{conv}
T_{sa}	<i>Temperatura del fluido en la salida del colector solar</i>	\dot{Q}_{conv}
T_i	<i>Temperatura inicial del agua almacenada en el experimento</i>	\dot{Q}_n
T_f	<i>Temperatura final del agua almacenada en el experimento</i>	\dot{Q}_n

Los datos por recabar son las temperaturas de la tabla anterior, además de la principal variable que interviene en el aprovechamiento energético, la cual es el flujo másico. En relación con el cálculo del flujo de calor neto (\dot{Q}_n), el intervalo de tiempo (Δt) se definió a 3 horas o a 10,800 segundos, de manera que las incógnitas a determinar son las dos energías internas del experimento, al inicio y al final de este, ambas pertenecientes al volumen de agua en el tanque de almacenamiento, cuyo valor se estableció como una constante desde el planteamiento.

Claramente la densidad y el calor específico del agua son variables que intervienen en el modelo de estudio, no obstante, ambos valores se obtuvieron a partir de la literatura en el primer capítulo, y se consideran como constantes para su respectiva sustitución en la sección destinada al balance de energía térmica (2.1.2).

2.2.2 Variables de control del sistema.

La bomba de circulación y la válvula reguladora de la figura 2.1, proporcionan un control sobre el flujo másico que circula en el sistema termosolar. Por consiguiente, este se establece como una variable de control y se determina de manera experimental, tomando en cuenta que a medida que aumenta el número del experimento, el flujo másico también aumenta.

Para cada experimento se tomó el tiempo que el caudal demoró en llenar un volumen de 2 [L], posteriormente, se multiplicó aquel volumen por la densidad del agua (ρ_a) y se dividió el resultado entre el tiempo de llenado de cada experimento, para conocer su flujo másico respectivo, ecuación (2.18), a la par de su gasto volumétrico; los valores de estas constantes se visualizan en la tabla 2.2, y el resto de los valores se introdujeron en la parte experimental.

$$\dot{m}_n = \frac{V \rho_a}{t_n} \quad (2.18)$$

Sin caer en contradicciones, a medida que aumenta el número del experimento su tiempo de llenado disminuye, en otras palabras, el experimento con mayor caudal es el cuarto, aquel con el valor mínimo de tiempo de llenado (t_4); a su vez el valor máximo de tiempo de llenado (t_1) se relaciona con el mínimo flujo másico experimental (\dot{m}_1).

Tabla 2.2. Flujos másicos y gastos volumétricos teóricos en cada experimento [1].

	<i>Exp 1</i>	<i>Exp 2</i>	<i>Exp 3</i>	<i>Exp 4</i>
$V[m^3]$	0.002			
$\rho_a [kg/m^3]$	996			
$m[kg]$	1.992			
$t_n[s]$	t_1	t_2	t_3	t_4
$\dot{m}_n[kg/s]$	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4
$G_n[L/min]$	G_1	G_2	G_3	G_4

Cabe destacar que la ecuación (2.16) involucra el cálculo de pérdidas térmicas representadas por el flujo de calor que sale del sistema (\dot{Q}_{sa}), para controlar los posibles valores de esta variable, se colocó un aislante térmico, tanto en el tanque de almacenamiento como en las secciones destinadas al transporte del fluido, lo que reduce su impacto dentro del balance energético. Por consiguiente, el sistema se analizó con la ecuación (2.17), puesto que se considera un sistema adiabático en las secciones ya mencionadas, y las únicas pérdidas térmicas significativas yacen en la etapa de captación.

2.2.3 Evaluación de la ganancia de energía en las diferentes secciones del sistema.

Para evaluar la cantidad de energía que ingresa, se transfiere y finalmente se aprovecha en los experimentos realizados, se capturaron las temperaturas de la tabla 2.1. Se colocaron cuatro termistores experimentales, uno en cada punto principal que se muestra en el diagrama del sistema termo-solar, figura 2.1. De modo que las ecuaciones de los flujos de calor involucrados en el balance de energía dependen de los valores registrados por dispositivos independientes.

El termistor cuatro registró las temperaturas en la superficie del colector solar, para los cálculos de flujo de calor por radiación, ecuación (2.19). Sin mencionar que estos mismos datos, junto a las

temperaturas ambientales, se utilizaron para obtener las pérdidas de flujo de calor por radiación, ecuación (2.20).

$$\dot{Q}_{rad} = 77.70 \times 10^{-9} \left[\frac{W}{K^4} \right] [T_{Tm4}^4] \quad (2.19)$$

$$\dot{Q}_{PR} = 77.70 \times 10^{-9} \left[\frac{W}{K^4} \right] [T_{Tm4}^4 - T_{amb}^4] \quad (2.20)$$

Los termistores uno y dos registraron las temperaturas de entrada y salida del agua en el colector solar, respectivamente, para los cálculos correspondientes al flujo de calor por convección, ecuación (2.21).

$$\dot{Q}_{conv} = 4,180 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \dot{m}_n (T_{Tm2} - T_{Tm1}) \quad (2.21)$$

El termistor tres registró las temperaturas del agua en el tanque de almacenamiento, por ello las energías internas quedan en función de estos datos, al igual que el cálculo del flujo de calor neto en cada experimento, ecuación (2.22).

$$\dot{Q}_n = \frac{Q_s}{\Delta t} = \frac{U_f(T_{Tm3}) - U_i(T_{Tm3})}{10,800[s]} \quad (2.22)$$

Finalmente, se calculó la eficiencia térmica del sistema termosolar, aquella se define como el flujo de calor neto que se aprovecha del sistema entre el flujo de calor total que entra al mismo, utilizando los términos de la ecuación (2.17), la eficiencia térmica del sistema queda expresada en la ecuación (2.23) a continuación:

$$\eta_{tér} = \frac{\dot{Q}_n}{\dot{Q}_{rad-total}} \quad (2.23)$$

En este trabajo el flujo de calor neto representa la energía que se acumuló durante las tres horas del proceso, por lo cual el flujo de calor total equivale al triple del flujo de calor por radiación promedio que ingresa al captador solar. Tomando en cuenta la expresión anterior, la eficiencia térmica experimental se obtuvo con la ecuación siguiente:

$$\eta_{tér} = \frac{\dot{Q}_n}{3\dot{Q}_{rad}} \quad (2.24)$$

La cantidad de irradiación promedio al día que llega a la región experimental y se puede aplicar al estudio de este sistema es la Irradiación Global Horizontal, cuyo valor es de $6.192 [kWh/m^2]$ de acuerdo con la tabla 1.5. Dado que el área de captación es de $1.44[m^2]$, el correspondiente flujo de calor por radiación promedio que es capaz de abarcar el sistema equivale a $8916.5[Wh]$, si se consideran tres horas para llevar a cabo cada experimento, el flujo de calor total que ingresa al sistema durante este periodo de tiempo es de $2972.16[W]$.

Ahora bien, según el balance de energía de la ecuación (2.17), el flujo de calor neto es equivalente a la diferencia del flujo de calor por radiación menos las pérdidas ambientales durante la etapa de captación. Al sustituir las igualdades (2.19) y (2.20) dentro de dicha diferencia, es factible establecer que, en teoría, el flujo de calor neto depende únicamente de la temperatura ambiental, ecuación (2.25).

$$\dot{Q}_n = 77.70 \times 10^{-9} \left[\frac{W}{K^4} \right] [T_{amb}^4] \quad (2.25)$$

En el caso donde los experimentos presenten una temperatura ambiental promedio de 30[°C], el flujo de calor neto tendría un valor de 656.22 [W], lo cual permite calcular una eficiencia térmica teórica de $\eta_{T.tér} \approx 0.22$, esto al sustituir los valores respectivos en la ecuación (2.23) como se muestra a continuación:

$$\eta_{T.tér} = \frac{\dot{Q}_n}{\dot{Q}_{rad-total}} = \frac{656.22[W]}{2,972.16[W]} \approx 0.22 \quad (2.26)$$



CAPÍTULO 3

Metodología experimental

3.1 Configuración experimental del modelo de estudio (arreglo experimental).

La configuración experimental consistió en un sistema termo-solar de circuito abierto con circulación forzada, donde la etapa de captación solar se proporcionó con un colector solar; el agua de la llave como fluido de calentamiento; un tanque tanto para la etapa de almacenamiento como de consumo; y no se empleó un sistema de calefacción auxiliar. Cabe destacar que las uniones, adaptaciones, codos y tubos, es decir la tubería general del circuito que se menciona a continuación, es de PVC hidráulico de una pulgada, a menos que se indique lo contrario. El aislante térmico que se utilizó fue recortes de una fibra de vidrio con aluminio, figura 3.1.



Figura 3.1. Aislante térmico acústico de fibra de vidrio con aluminio

Con el propósito de simplificar la conexión entre los elementos principales que se observan en la figura 2.1, y habiendo tomado en cuenta los requerimientos de uso expresados en el manual de propietario del colector solar, se construyó una base para soportar dicho colector. La base se elaboró como una mesa, con estructura principal de perfiles de aluminio 4040 y una superficie de madera triplay (pino) de 0.015 [m] de grosor; sus dimensiones finales fueron de 1.10[m] de altura con un área superficial de 1.22 x 1.22 [m^2], como se puede observar en la figura 3.2 y 3.3.



Figura 3.2 Estructura de la base del colector solar.



Figura 3.3 Colector solar en su base.

El colector solar que se utilizó se conoce comercialmente como “Solar Heater Mat”, el material del que está hecho es un compuesto de Poliéster reforzado con PVC. Tiene un área superficial de 1.20 x 1.20 [m^2] de color negro. Con respecto a su funcionamiento interno, el producto cuenta con dos entradas y una sola salida, ambas entradas se interconectan con una válvula bypass, es decir, el colector se divide en dos circuitos, el primero en forma de serpentin “S”, lo cual es propiamente el sistema de captación solar; mientras que el segundo es un circuito recto que parte de la válvula bypass hasta a la salida. En la figura 3.4 se observan ambos circuitos del colector, junto con sus dimensiones de área.

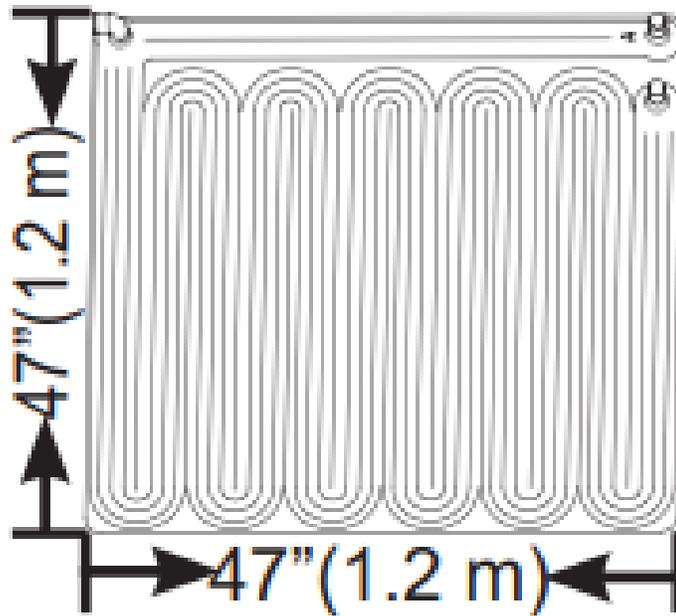


Figura 3.4. Solar Heater Mat

Para el tanque de almacenamiento se utilizó un tambo de plástico color azul con diámetro interior de 0.60[m], altura de 0.90[m] y una capacidad de hasta 208 litros aproximadamente, como se muestra en la figura 3.5. A dicho recipiente se le hicieron un par de orificios colineales de una pulgada de diámetro, los dos a un costado del tanque, uno en la parte baja del tambo para la circulación del agua con menor temperatura; y otro a una altura intermedia para la ubicación del tercer termo-pozo del arreglo experimental, figura 3.7; en ambos espacios se colocaron las adaptaciones respectivas de tubería con silicona. Se cortó una sección de madera triplay (pino) que actuó como una tapa rectangular con un orificio central de una pulgada de diámetro, para el ingreso del agua con mayor temperatura. Finalmente, se recubrió el tanque con el aislante térmico ya mencionado, para reducir la transferencia de energía térmica con el exterior. La fibra se recortó casi a la medida del diámetro del tanque y se unió al mismo con cuatro fijaciones exteriores de alambre, figura 3.6.



Figura 3.5 Tambo de plástico experimental.



Figura 3.6 Tanque de almacenamiento con recubrimiento de fibra de vidrio con aluminio.



Figura 3.7 Adaptador del tanque para el tercer termo-pozo

La circulación forzada se proporcionó mediante una bomba periférica de agua, la cual cuenta con una potencia de 0.5 [HP], y una capacidad de flujo máxima de 31 [L/min], figura 3.8. Se construyó una pequeña base para atornillar la bomba, igualmente con una estructura principal de perfiles de aluminio 4040 y una superficie de madera triplay (pino) de 0.015 [m] de grosor, figura 3.11. En la entrada y salida de la bomba se pusieron adaptadores macho.



Figura 3.8. Bomba eléctrica periférica para agua.

Se instaló una válvula de compuerta de una pulgada, figura 3.9, como válvula reguladora de flujo, a la cual se le colocaron adaptadores macho en sus extremos. Al tener todos los elementos principales

del circuito en el área experimental, figura 3.10 y 3.11, estos se fueron conectando de manera secuencial. Primero se conectó la entrada de la bomba con la parte baja del almacenamiento, mediante una unión universal lisa. Después se conectó la salida de la bomba con un extremo de la válvula reguladora, de la misma forma, mediante una unión universal lisa, figura 3.11.



Figura 3.9. Válvula de compuerta 1 pulgada dorado muller.



Figura 3.10. Elementos principales: Colector solar y tanque de almacenamiento



Figura 3.11. Elementos principales: Bomba de circulación y válvula de corte

Posteriormente, se implementó la tubería para alcanzar la altura de entrada al colector. La trayectoria del flujo en el circuito se cambió de una dirección vertical a una horizontal con un codo de 90°, el cual se conectó con el primer termo-pozo del circuito, a su vez éste se unió a un adaptador para la entrada del colector solar. Las conexiones directas de entrada y salida del colector se llevaron a cabo con una tubería de plástico transparente, tipo manguera, por lo cual se implementaron los adaptadores ya mencionados para interconectar los termo-pozos, tanto en la entrada como en la salida. De tal manera que, desde la salida del colector hasta la entrada superior del tanque de almacenamiento, la pequeña sección perteneciente al segundo termo-pozo es la única que contiene tubería PVC hidráulica dentro del tramo ya mencionado. La tubería respectiva a los termo-pozos 1 y 2 se muestra en la figura 3.12, los cuales se interconectan con la tubería de los adaptadores, figura 3.13.



Figura 3.12. Conexión para los termo-pozos (1,2)



Figura 3.13. Conexión de adaptador para la entrada y la salida del colector solar.

En el cambio de dirección, después del codo de 90°, y justo antes de la entrada al colector solar, se implementaron soportes de tubería, con el propósito de sujetar la tubería PVC y mantener el flujo en una misma altura, estos soportes se hicieron a partir de perfiles de aluminio 4040 y se unieron con las bases, ya construidas previamente, mediante tornillería M6 y pijas para madera. Una vez realizadas las conexiones de flujo del circuito, se llenó el tanque de almacenamiento con agua de la llave hasta una altura de 0.63[m] (tanque de almacenamiento), inmediatamente después se encendió la bomba para observar la adecuada circulación del agua y detectar posibles fugas de fluido, figura 3.14.



Figura 3.14 Prueba de funcionamiento del circuito experimental

Finalmente, se recubrió toda la tubería con aislante térmico para evitar pérdidas convectivas. En los termo-pozos 1, 2 y 3, se colocaron termo células de acero inoxidable 200, en los primeros dos de una longitud total de 30 [mm], mientras que el tercero se colocó una con longitud total de 150 [mm], ambos se muestran en la figura 3.15. De esta forma se completó la conexión del sistema termo-solar, figura 3.16.



Figura 3.15 Termocélula de acero inoxidable 200 para sensor de temperatura: longitud de 30 y 150 [mm]



Figura 3.16 Sistema termosolar experimental.

3.2 Evaluación del flujo másico en el sistema.

Se llevaron a cabo cuatro experimentos para cuatro diferentes flujos másicos. Desde la perspectiva que muestra la figura 3.14, la válvula reguladora se cierra en sentido horario y se abre en sentido antihorario; se cerró completamente y se le agregó un indicador de posición con cinta de aislar negra, de tal forma que a medida que la válvula giraba en sentido antihorario, se establecieron las posiciones de los cuatro flujos de forma cualitativa; los cambios de flujo se observaron en la salida del colector, justo en la entrada al tanque de almacenamiento. Como se mencionó en el capítulo 2 del presente documento, para cada posición se tomó el tiempo que el caudal demoraba en llenar un volumen de 2 [L], mediante iteraciones de este procedimiento se fijaron nuevas posiciones de los cuatro flujos, en este caso de forma cuantitativa. Dichas posiciones se pueden observar de la figura 3.17 a la figura 3.20. correspondientes a cada experimento. Complementando la información experimental de la tabla 2.2, los flujos másicos experimentales se muestran en la Tabla 3.1, previamente a su gasto volumétrico respectivo.

Tabla 3.1. Flujos másicos y gastos volumétricos en cada experimento

	<i>Exp 1</i>	<i>Exp 2</i>	<i>Exp 3</i>	<i>Exp 4</i>
$V[m^3]$	0.002			
$\rho_a [kg/m^3]$	996			
$m[kg]$	1.992			
$t_n[s]$	41.56	24.77	19.70	16.60
$\dot{m}_n[kg/s]$	0.048	0.080	0.101	0.120
$G_n[L/min]$	2.887	4.845	6.091	7.229



Figura 3.17 Experimento 1



Figura 3.18 Experimento 2



Figura 3.19 Experimento 3



Figura 3.20 Experimento 4

3.3 Adquisición de datos de temperatura.

Para obtener las temperaturas de la tabla 2.1, se realizó la calibración de los termistores NTC 3950 100K con cableado de 1 metro y cabeza de pin hembra, figura 3.21. De manera paralela, se obtuvieron datos de las temperaturas alcanzadas en la superficie del colector solar mediante la captura de imágenes con una cámara termográfica, figura 3.22., y en el caso de la temperatura ambiental se utilizó un termómetro digital de contacto, figura 3.23.



Figura 3.21 Termistores NTC 100K



Figura 3.22 Cámara Termográfica



Figura 3.23 Termómetro de Contacto

3.3.1 Termistores su selección y calibración.

Se configuró el diagrama de conexión eléctrica para cada termistor como un divisor de voltaje, figura 3.24, en el cual el voltaje de alimentación (V_{in}) se divide entre la resistencia fija de $100 [k\Omega]$ (R_0) y la resistencia variable (R_t), cuyo valor cambia de manera inversa a la temperatura. Por lo tanto, a partir de la ecuación (3.1), se despejó la resistencia variable resultando en la ecuación (3.2), ya que la señal que entrega cada termistor es propiamente un voltaje de salida (V_{out}) variable.

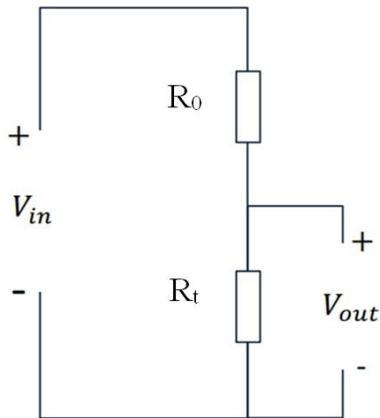


Figura 3.24 Diagrama divisor de Voltaje

Ecuación del divisor de voltaje:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_t}{R_0 + R_t} \quad (3.1)$$

Despejando para la resistencia variable:

$$R_t = \frac{V_{out} R_0}{V_{in} - V_{out}} \quad (3.2)$$

En la adquisición de los voltajes de salida se utilizó el dispositivo de adquisición de datos USB multifunción National Instruments (NI) USB-6008, figura 3.25. Específicamente, las cuatro entradas analógicas positivas (AI+), que se muestran en la parte izquierda de la figura 3.26, se configuraron como conexión simple o single-ended para cada termistor.

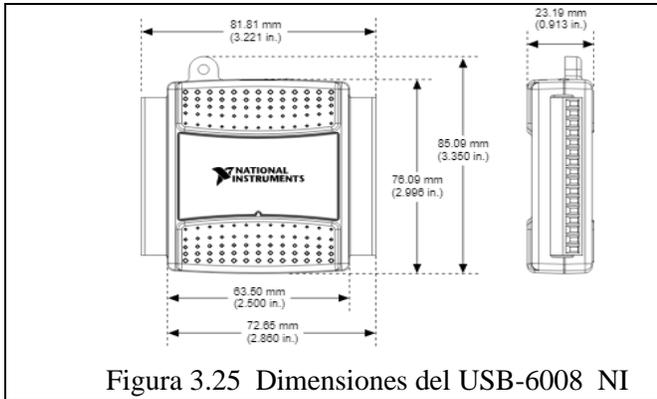


Figura 3.25 Dimensiones del USB-6008 NI

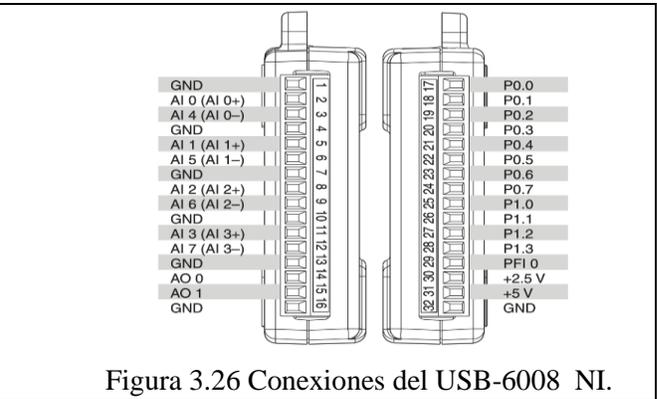


Figura 3.26 Conexiones del USB-6008 NI.

La conexión de termistores experimental se implementó por medio de una placa de circuito impreso (PCB), la cual obtuvo su alimentación por parte de los pines 31 y 32 del USB-6008 NI, figura 3.26, por lo que cada divisor de voltaje recibió una alimentación aproximada de cinco voltios. Entre la resistencia fija y el termistor, se estableció la interconexión de la señal analógica, de tal forma que el diagrama expuesto en la figura 3.24 se llevó a cabo. Finalmente, el USB-6008 NI se alimentó y se comunicó de forma serial con una computadora portátil, figura 3.27.



Figura 3.27. Conexión de termistores experimental

Se desarrolló un solo programa en MATLAB para la calibración de termistores y posteriormente para la adquisición de datos experimentales. El programa que se muestra en la sección 1 del anexo, trabaja con las configuraciones de conexión y mediciones de la Tabla 3.2. La calibración empieza en el cálculo, por segundo, de las resistencias variables que presenta cada termistor al aumento homogéneo de temperatura, durante un periodo de 2 horas aproximadamente, y concluyó con el modelo de regresión de temperatura para cada termistor.

Tabla 3.2 Conexiones de entrada analógica y mediciones en la PCB por cada termistor.

	T_{m1}	T_{m2}	T_{m3}	T_{m4}
Conexión NI	A0 (AI 0+)	A1 (AI 1+)	A2 (AI 2+)	A3 (AI 3+)
$R_0[k\Omega]$	101	100.2	100.3	100.7
$V_{in}[V]$	5.09			

El aumento homogéneo de temperatura se ejecutó dentro del criostato de circulación CORIO CD, este dispositivo se define como un termostato con máquina de enfriamiento, figura 3.28. Se llenó el recipiente con 4[L] de agua destilada, se introdujeron los sensores y se configuró el termostato para una rampa de aumento de 10 a 80 [°C], cada intervalo de 5 [°C] se ejecutó en el transcurso de 10 min. Una vez que el agua a temperatura ambiente se enfrió hasta alcanzar el estado inicial, se procedió a la adquisición de datos.



Figura 3.28 Criostato de circulación CORIO CD 201F.

Se utilizó el programa OriginPro para comparar los datos de la rampa de temperatura con las resistencias calculadas. Debido a la naturaleza del programa de MATLAB, hubo una falta de sincronización entre el tiempo de procesamiento de este mismo y el tiempo transcurrido en el proceso de calibración, es decir, el intervalo de un segundo a otro fue mayor en el programa de adquisición que en el criostato de circulación, por lo que los valores, iniciales y finales, de resistencias fueron comparados con sus temperaturas respectivas. De tal forma que, para los datos intermedios, dentro del rango de 10 a 80 [°C], se realizó una interpolación de valores de temperaturas, las cuales se compararon con las resistencias obtenidas, para posteriormente determinar el modelo de regresión. A continuación, se presentan las gráficas de resistencia vs temperatura, de la figura 3.29 a la 3.32, que representan el comportamiento de cada termistor al aumento de temperatura.

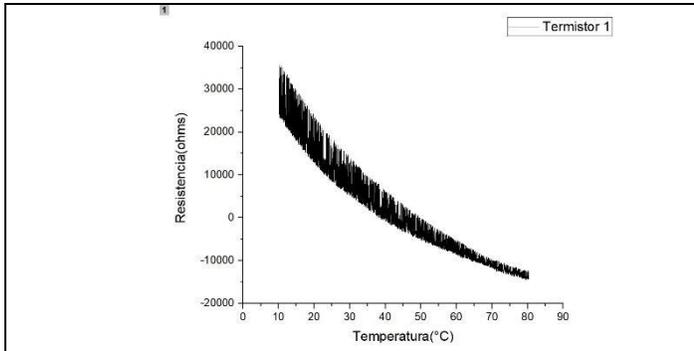


Figura 3.29 Gráfica resistencia vs temperatura T_{m1}

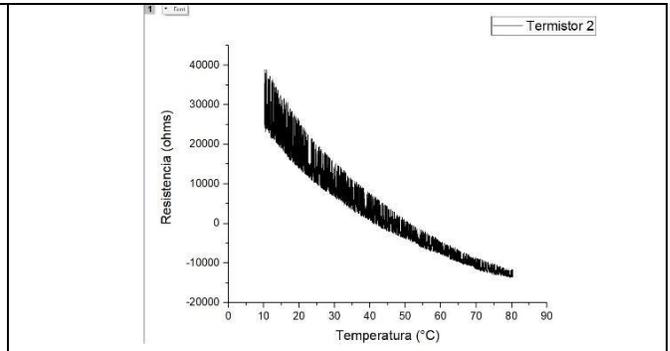


Figura 3.30 Gráfica resistencia vs temperatura T_{m2}

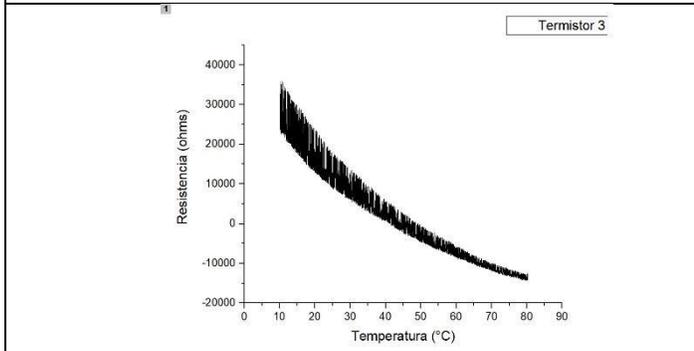


Figura 3.31 Gráfica resistencia vs temperatura T_{m3}

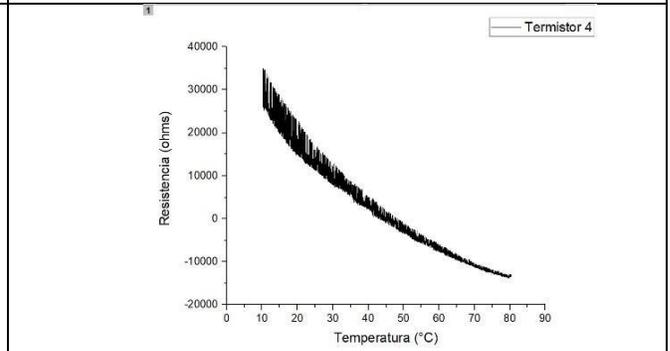


Figura 3.32 Gráfica resistencia vs temperatura T_{m4}

Una vez obtenido el correcto emparejamiento de información, se realizó un programa en Python para filtrar el ruido presente en el comportamiento de cada termistor. En el procedimiento de filtración se promedió la resistencia inicial con los siguientes 49 datos de su misma lista, posteriormente se realizó lo mismo con el valor secundario de resistencia, así de forma consecutiva hasta el valor $L - 50$, donde “ L ” representa la posición de la resistencia final. Como resultado se obtuvieron las gráficas de la figura 3.33, las cuales presentan el mismo comportamiento de cada termistor, pero sin el ruido experimental.

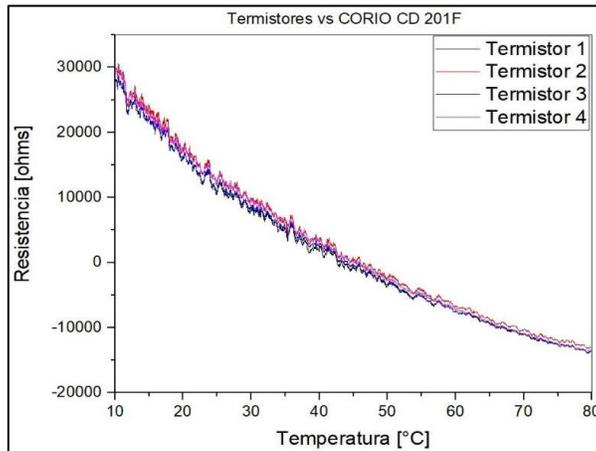


Figura 3.33. Gráfica de señales filtradas para la calibración de los cuatro termistores.

Para finalizar con el proceso de calibración, en el programa OriginPro se realizó una regresión polinomial de cuarto orden, ya que resultó ser aquella función que más se ajustó al comportamiento observado en la figura 3.33. De esta forma, para el termistor NTC 3950 100K, se obtuvo un modelo de regresión polinomial de cuarto orden que relaciona a la temperatura en función de la resistencia variable, cuya forma general es la ecuación (3.3).

Modelo de regresión polinomial de cuarto orden:

$$T(R) = R_0 + C_1R + C_2R^2 + C_3R^3 + C_4R^4 \quad (3.3)$$

Donde, R_0 representa el valor inicial de la resistencia a la temperatura de referencia (evaluada en grados centígrados), R es el valor de la resistencia variable (evaluada en Ohms), y C_{1-4} las respectivas constantes que integran el modelo polinomial, definidas en términos de grados centígrados sobre Ohms a la n potencia.

Las constantes de la tabla 3.3 se aplicaron de manera respectiva para cada termistor en la ecuación general (3.3). Así se obtuvieron los modelos individuales de los cuatro termistores experimentales, los cuales se observan en la figura 3.34.

Tabla 3.3 Constantes de cada modelo de regresión polinomial.

TERMISTORES	CONSTANTES DEL MODELO				
	$R_0[^\circ\text{C}]$	$C_1[\frac{^\circ\text{C}}{\Omega}]$	$C_2[\frac{^\circ\text{C}}{\Omega^2}]$	$C_3[\frac{^\circ\text{C}}{\Omega^3}]$	$C_4[\frac{^\circ\text{C}}{\Omega^4}]$
Termistor 1(T_{m1})	43.39273	-0.00190	3.81154E-8	-7.9173E-13	1.29232E-17
Termistor 2(T_{m2})	45.62187	-0.00188	3.54714E-8	-9.47681E-13	1.88188E-17
Termistor 3(T_{m3})	44.04836	-0.00183	3.25734E-8	-10.2203E-13	2.47377E-17
Termistor 4(T_{m4})	45.16842	-0.00179	3.14059E-8	-11.5906E-13	2.76370E-17

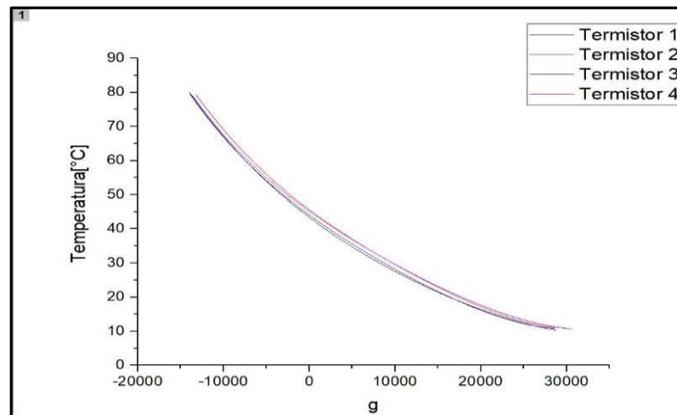


Figura 3.34. Gráfica de regresiones polinomiales de los cuatro termistores.

3.3.2 Adquisición de datos mediante termistores

Se colocaron los termistores de acuerdo con el diagrama de la figura 2.1. Los termistores T_{m1} y T_{m2} se introdujeron en los termo-pozos de 30[mm], en la entrada y salida al colector, respectivamente. El T_{m3} se insertó en la termo célula de 150[mm] del tanque de almacenamiento, y T_{m4} se posicionó sobre la superficie del colector solar. El equipo de adquisición de datos, que involucra al USB-6008 NI con la pcb y una computadora portátil, se posicionó debajo de la base del colector solar, como se observa en la figura 3.35, con el fin de evitar un sobrecalentamiento de este. A un costado de este equipo se posicionó el termómetro digital, cuidando que no entrará en contacto con alguna superficie más que el aire circundante. Entre cada experimento, únicamente se desconectó la computadora portátil, de tal forma que las mediciones se dieron en las mismas posiciones.



Figura 3.35 Sistema termosolar con equipo de adquisición de datos.

El proceso de adquisición se llevó a cabo en cuatro días, uno por experimento. Para cada uno, al inicio se configuró el flujo másico respectivo; después se conectó la computadora portátil; y finalmente, a partir de las 11 horas del día, se encendió la bomba de circulación junto con el inicio del programa de adquisición. A dicho programa, utilizado previamente en la etapa de calibración, se le modificaron los segundos de procesamiento a 8,000, lo equivalente a las tres horas de mayor exposición de radiación solar en el día. En otras palabras, se capturaron 8,000 datos de resistencias variables por cada termistor, los cuales se almacenaron en archivos separados por comas para su posprocesamiento. Se registraron las temperaturas ambientales cada media hora, de forma que fue posible conocer el comportamiento promedio de cada experimento en siete puntos diferentes. Posteriormente, a cada experimento, el fluido se puso en circulación durante un par de horas en el periodo nocturno, con el tanque destapado, para incentivar la pérdida de energía térmica almacenada, y así, que cada experimento tuviera un punto inicial equivalente, únicamente sujeto a la temperatura ambiental.

3.3.3 Adquisición de datos mediante cámara termográfica y su evaluación.

La cámara termográfica se configuró con la emisividad del colector solar, aquella que se utilizó para los cálculos de flujo de calor por radiación, expuesta en el Capítulo 2. Una vez iniciado el experimento respectivo, se tomaron fotos del colector solar, específicamente al medio día, buscando capturar los mayores valores relacionados a la radiación solar. Aproximadamente, cinco horas después de finalizado el experimento, se tomaron también un par de fotografías al agua almacenada, con el objetivo de conocer la cantidad de energía perdida horas después de que el sistema termo-solar estuviera inactivo, sin embargo, dichas pérdidas se calcularon únicamente en el experimento que presentó el mayor aprovechamiento energético. Cabe mencionar que de acuerdo con la tabla 1.2, la emisividad del agua es igual a la ya configurada para el colector solar, por lo cual no fue necesario un cambio en la configuración del dispositivo.

Cada imagen termográfica muestra un valor puntual de temperatura, junto con un rango de las temperaturas presentes, todas en grados centígrados. Para el cálculo del flujo de calor por radiación se consideraron los valores máximos de temperatura. En este caso, los flujos de calor resultantes representan valores puntuales del sistema en una etapa casi intermedia, en atención a lo cual fue posible una comparación con los datos obtenidos por los termistores.

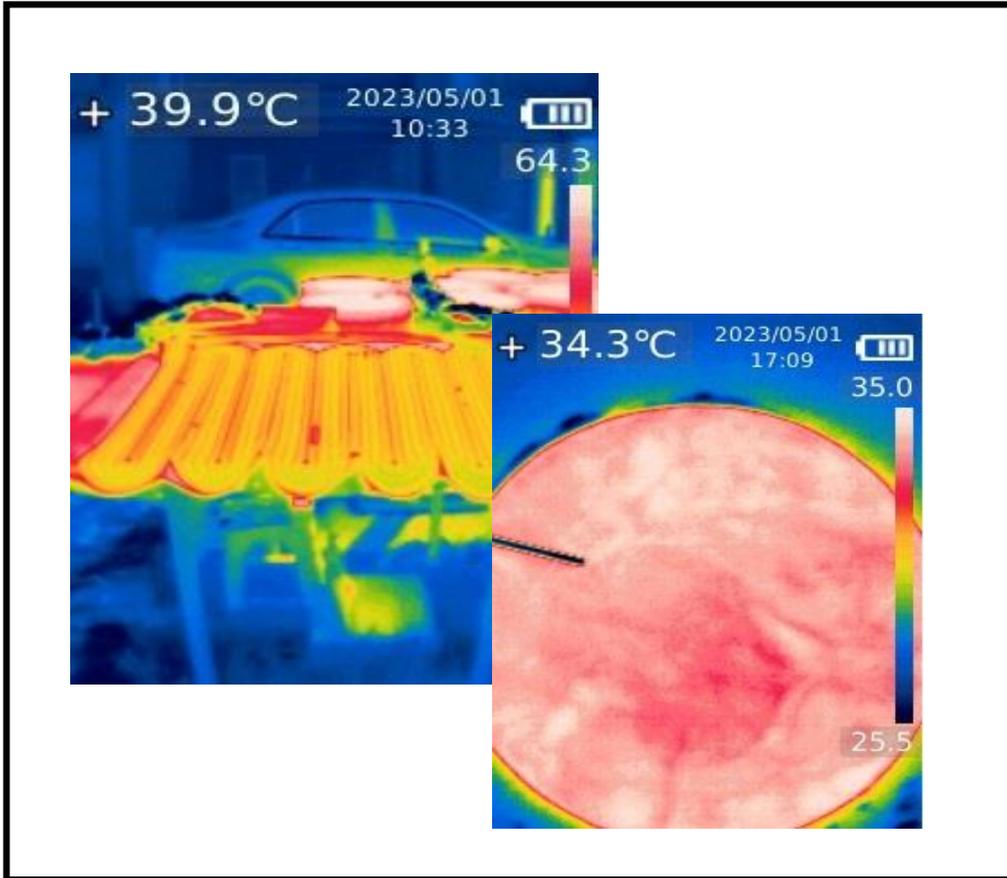
3.3.4 Evaluación de datos de termistores mediante técnicas de posprocesamiento de datos.

Las resistencias variables almacenadas, mencionadas al final de la sección 3.3.2, se filtraron mediante el programa de Python, lo que permitió reducir el ruido experimental de cada termistor. Más adelante, utilizando el modelo de regresión polinomial y las constantes correspondientes de la tabla 3.3., las resistencias filtradas se transformaron en las temperaturas del sistema. Finalmente, de acuerdo con las ecuaciones de la sección 2.2.3, se calcularon los flujos de calor. Este proceso se llevó a cabo para cada experimento.

El análisis de los flujos de calor se dividió en dos secciones:

- a) Dispersión: Dado que el balance de energía indica que los flujos de calor por radiación y por convección a lo largo de todo el experimento deben presentar el mismo comportamiento, pero con una diferencia de valores. La primera parte consistió en el estudio de las medidas de tendencia central y de dispersión para representar la distribución de dichos flujos de calor a lo largo de todo el experimento. Por lo tanto, se buscó estudiar estas medidas mediante distribuciones normales, o en su defecto cuartiles con gráficos de cajas, cuyos resultados reflejan el impacto de cada caudal en la absorción y transferencia de energía térmica.

- b) Intervalos: De forma independiente los flujos de calor por radiación se dividieron en siete secciones diferentes, una sección por cada 30 min del experimento. Después se obtuvo el promedio de cada sección y se compararon los experimentos entre sí. El mismo procedimiento se aplicó para las energías internas. También se obtuvieron los flujos de calor perdidos por radiación para su estudio comparativo. Finalmente, se calculó el flujo de calor neto a la par de la eficiencia térmica experimental. En esta segunda parte se compararon los experimentos entre sí, mediante intervalos de media hora, para determinar el flujo másico que proporciona un mayor aprovechamiento energético y una mayor eficiencia térmica.



CAPÍTULO 4

Resultados y discusión

4.1 Comportamiento de la temperatura en el sistema (tiempo).

Las imágenes termográficas de cada experimento se muestran a en las siguientes figuras (4.1 – 4.4). Cabe destacar que las fechas y horarios en dichas figuras no son representativas, es decir el tiempo expuesto en las fotografías no es acorde al tiempo experimental.

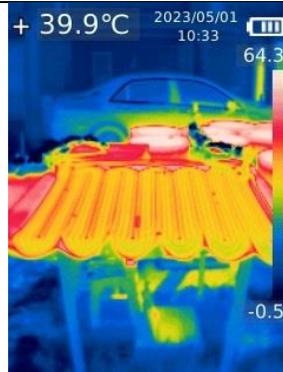


Figura 4.1 Foto termográfica del colector solar en el experimento 1

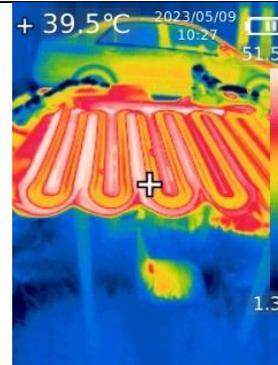


Figura 4.2 Foto termográfica del colector solar en el experimento 2

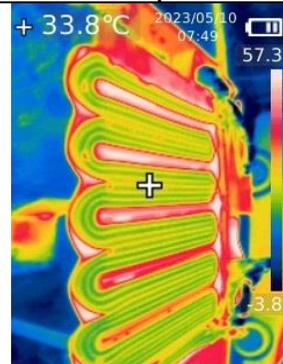


Figura 4.3 Foto termográfica del colector solar en el experimento 3

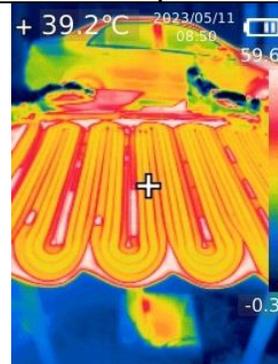


Figura 4.4 Foto termográfica del colector solar en el experimento 4

Las temperaturas puntuales son muy similares en todos los casos, con excepción del tercero. No obstante, el experimento con mayor radiación solar incidente es el primero, puesto que los valores de temperatura máxima y puntual son superiores en comparación. Tomando en cuenta sólo las imágenes termográficas, el experimento capaz de brindar una mayor energía al agua almacenada se da en la figura 4.1. En la tabla 4.1, están las temperaturas ambientales registradas. Los valores promedio de estas temperaturas se acercan al valor de la temperatura ambiental en el cálculo de la eficiencia térmica teórica, al final de la sección 2.2.3., por ende, es factible esperar valores de eficiencia térmica superiores al 0.22.

Al igual que las temperaturas superficiales de las imágenes termográficas, estas temperaturas muestran una similitud de condiciones ambientales.

Tabla 4.1 Temperaturas ambientales por experimento.

Tiempo	Exp 1 [°C]	Exp 2 [°C]	Exp 3 [°C]	Exp 4 [°C]
11:00	29	32.4	31.9	26.6
11:30	31.2	33.2	32.2	29
12:00	32.2	33.5	34.8	29.1
12:30	31.5	31	31.3	29.2
13:00	32	32	31.9	32
13:30	34.4	32.7	35.2	31.6
14:00	33.7	33	36.5	34
Promedio	32.0	32.5	33.4	30.2

Termistores: Se graficaron las resistencias variables registradas por los cuatro termistores en cada experimento, al igual que sus valores ya filtrados, dichas gráficas se pueden visualizar en la sección Anexo. Como era de esperarse las resistencias presentaron un comportamiento descendente, ya que en el proceso experimental las temperaturas del sistema realmente van en incremento. Por consiguiente, como primera observación se puede afirmar que las temperaturas expuestas en las siguientes cuatro figuras, si son representativas

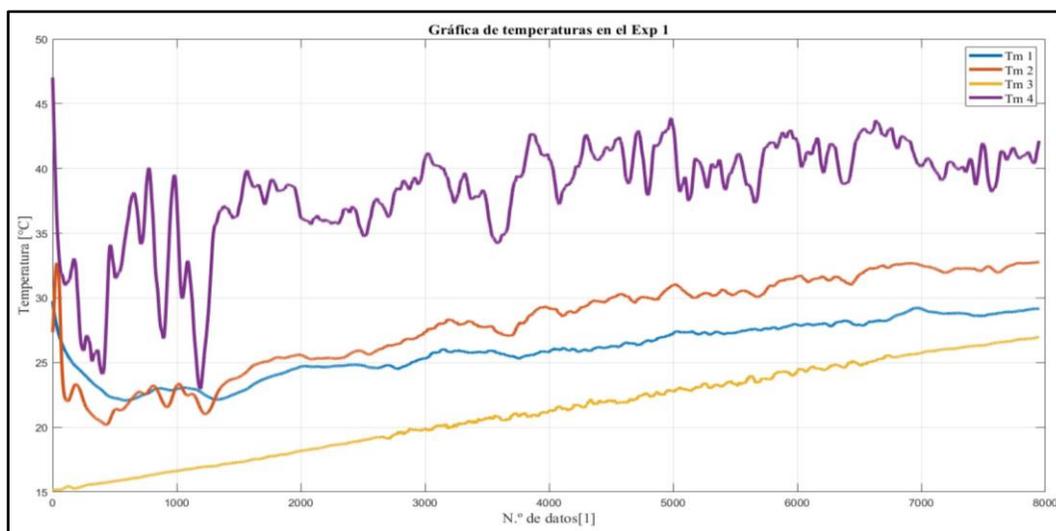


Figura 4.5 Gráfica de temperaturas en el Experimento 1.

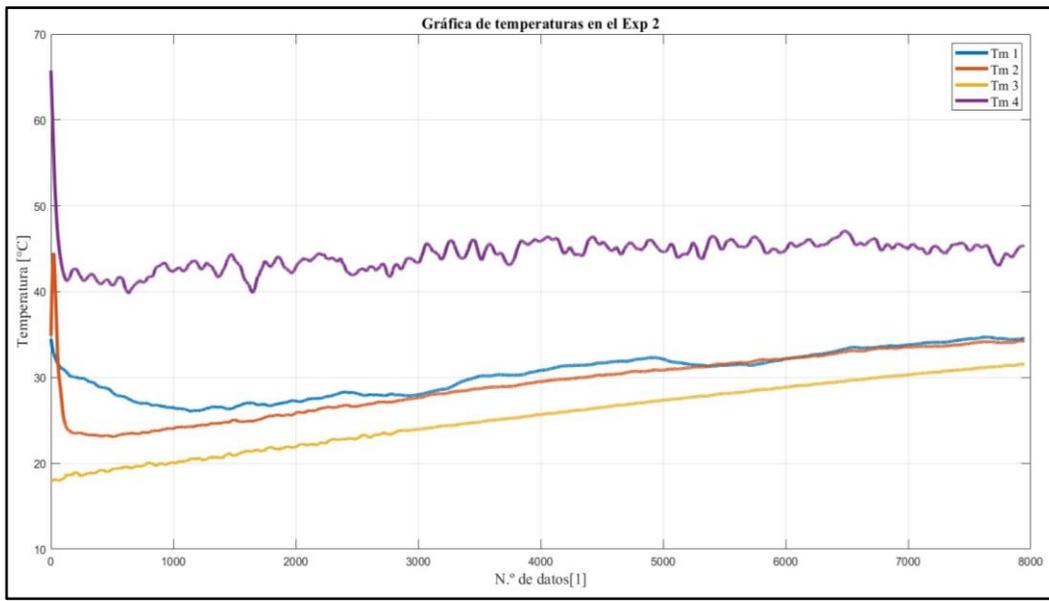


Figura 4.6 Gráfica de temperaturas en el Experimento 2.

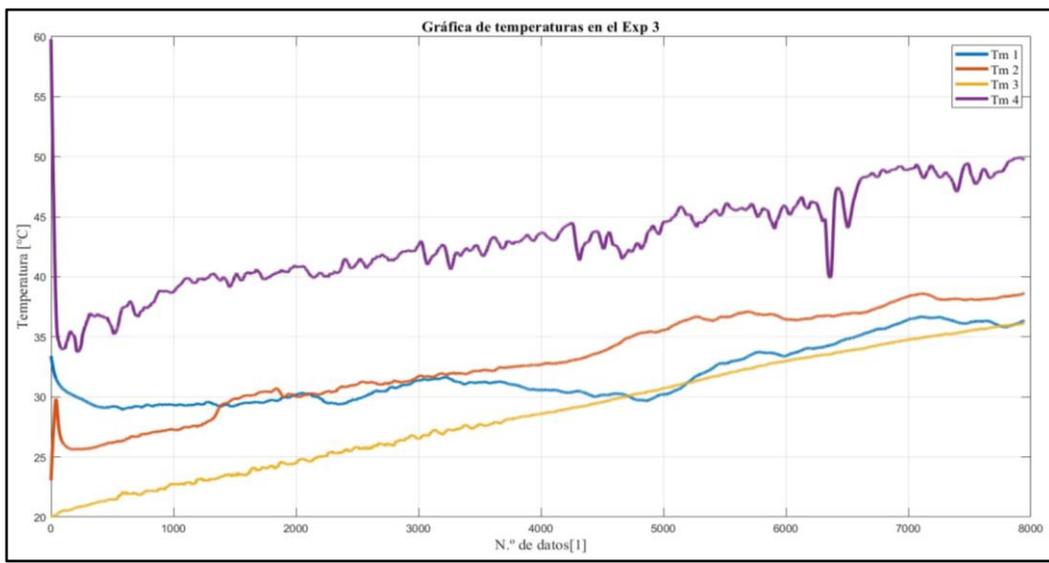


Figura 4.7 Gráfica de temperaturas en el Experimento 3

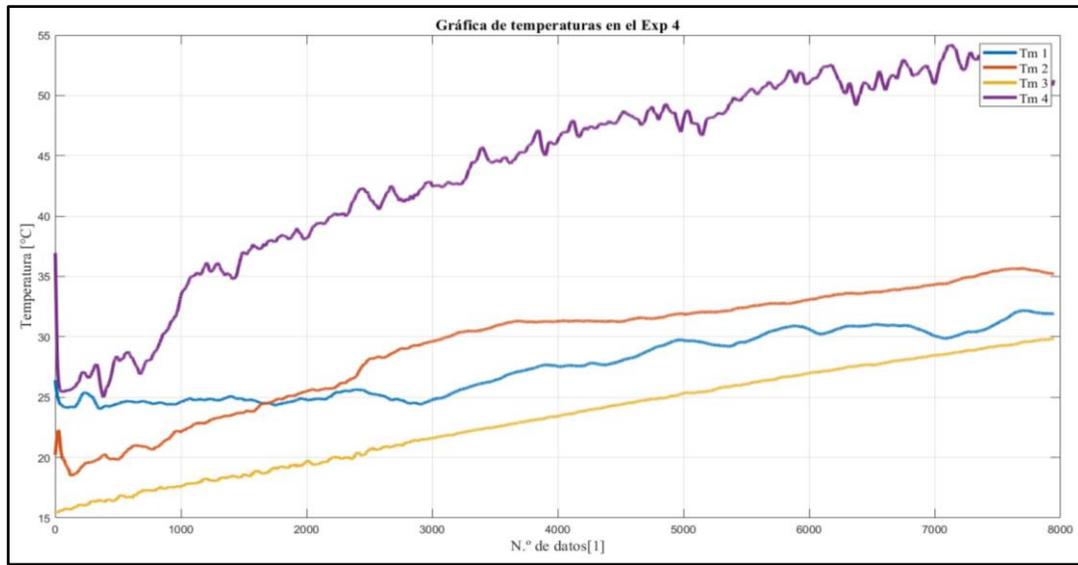


Figura 4.8 Gráfica de temperaturas en el Experimento 4.

El comportamiento general de los cuatro termistores describe la captación, transferencia, y almacenamiento de energía térmica en cada experimento. La captación de energía solar se observa en los datos del termistor cuatro, el cual sufre una caída abrupta de temperatura al comienzo del proceso, mayormente en la figura 4.7, debido a la circulación de agua con menor energía térmica. Al inicio, la superficie del colector solar tiene una temperatura superior a los 50 [°C], después de la reducción ya mencionada, se da un incremento mínimo de 10 [°C], con excepción del segundo experimento. El flujo másico modifica directamente la temperatura superficial, ya que, en su menor cantidad, figura 4.5, se observa la mayor intermitencia de estos valores; sin mencionar que en el cuarto experimento el incremento de temperatura adquiere su máximo valor.

La transferencia de energía térmica se muestra directamente en el comportamiento de los termistores uno y dos; ambos convergen dentro del rango de 1000 a 2000 datos procesados, lo equivalente en tiempo a 22.5 y 45 minutos de iniciado el proceso, respectivamente. Posterior a la convergencia, las gráficas presentan un “intercambio” de posiciones, puesto que la temperatura del primer termistor tiende a tener la misma temperatura del agua almacenada, un claro ejemplo se da en la figura 4.7; mientras que la temperatura del segundo termistor tiende a alcanzar la temperatura superficial, es decir representa la energía térmica que el sistema adquiere al pasar por el colector solar, por este mismo motivo su comportamiento es paralelo a la gráfica del termistor tres.

En la figura 4.6, correspondiente al segundo experimento, las gráficas de transferencia se demoran aproximadamente dos horas en converger, no obstante, en casi todo el proceso ambos termistores mantienen valores cercanos. En este caso, debido a la cantidad de flujo másico presente, la temperatura superficial no tiene un incremento superior a los 10 [°C], por lo que el agua que entra y que sale del colector solar aumentan su temperatura de manera semejante. Así mismo, el almacenamiento de energía

térmica que se observa en la gráfica del termistor tres, muestra un comportamiento semejante. El agua dentro del tanque de almacenamiento se encuentra inicialmente a una temperatura menor o igual a los 20 [°C], y en tres horas incrementa 10 [°C], al igual que en el experimento uno, o 15 [°C] como en los experimentos tres y cuatro.

4.2 Efectos del flujo másico en la ganancia de energía del sistema.

En la sección anterior, se mencionó una influencia del flujo másico en la adquisición de los datos de temperatura; no obstante, los efectos que cada caudal presenta en la energía térmica del sistema se muestran en los análisis de dispersión, y en los intervalos de energía interna, figura 4.13. Para los análisis de dispersión se calcularon los coeficientes de asimetría y curtosis de los flujos de calor involucrados, los cuales se presentan en la sección Anexo, de acuerdo con estos parámetros se determinó que únicamente los experimentos tres y cuatro cumplen con una dispersión normal.

Tabla 4.2 Valores del diagrama de caja del experimento 1.

<u>Flujos de Calor</u>	<u>Exp1</u>				
	<i>Mínimo [W]</i>	<i>Cuartil Q1 [W]</i>	<i>Cuartil Q2 [W]</i>	<i>Cuartil Q3 [W]</i>	<i>Máximo [W]</i>
\dot{Q}_{rad}	596.35	716.14	737.45	755.30	798.43
\dot{Q}_{conv}	0.01	270.58	563.43	697.11	1021.34

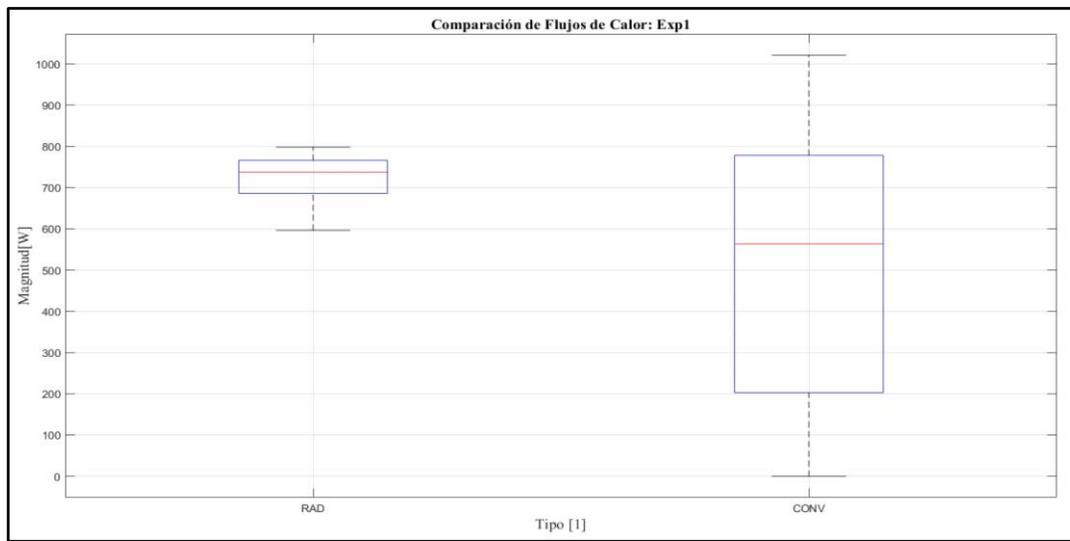


Figura 4.9 Diagrama de caja del experimento 1.

Tabla 4.3 Valores del diagrama de caja del experimento 2.

<u>Flujos de Calor</u>	<u>Exp2</u>				
	<i>Mínimo [W]</i>	<i>Cuartil Q1 [W]</i>	<i>Cuartil Q2 [W]</i>	<i>Cuartil Q3 [W]</i>	<i>Máximo [W]</i>
\dot{Q}_{rad}	743.83	775.97	790.24	799.12	998.87
\dot{Q}_{conv}	0.01	123.05	410.42	509.09	3934.87

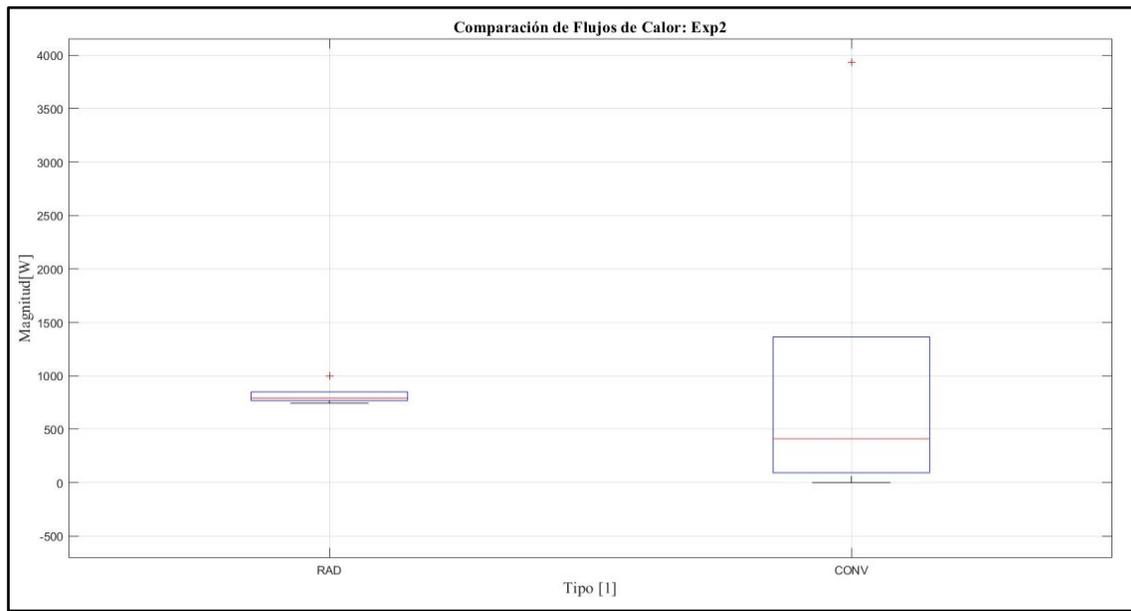


Figura 4.10 Diagrama de caja del experimento 2.

Tabla 4.4 Valores de las distribuciones normales en los experimentos 3 y 4.

<u>Flujos de Calor</u>	<u>Exp3</u>		<u>Exp4</u>	
	<i>Promedio [W]</i>	<i>Desviación Estándar [W]</i>	<i>Promedio [W]</i>	<i>Desviación Estándar [W]</i>
\dot{Q}_{rad}	775.70	36.97	786.65	76.73
\dot{Q}_{conv}	946.74	618.36	1558.54	655.67

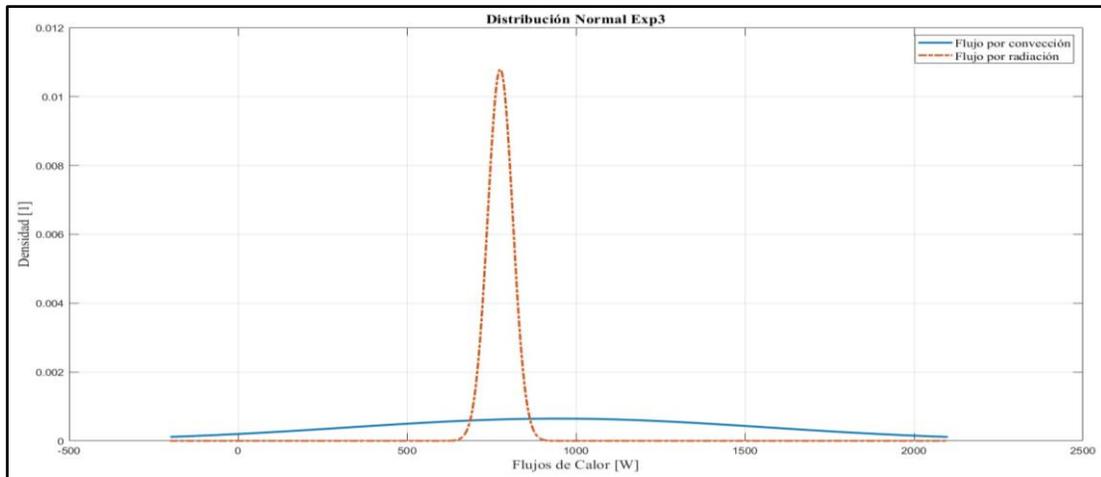


Figura 4.11 Distribución normal del experimento 3.

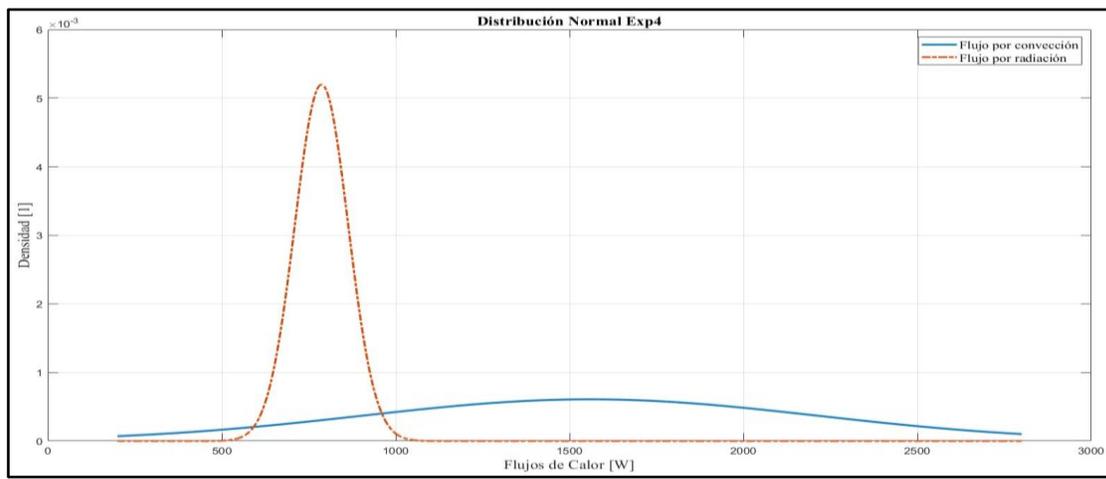


Figura 4.12 Distribución normal del experimento 4.

Tomando en cuenta los cuartiles de los primeros dos experimentos junto con los valores de la tabla 4.3, se conoce que los flujos de calor por radiación en los cuatro experimentos se encuentran, en su mayoría, en un rango de 700 a 800 [W]. Por otro lado, para los flujos de calor por convección existe una mayor dispersión de valores.

Particularmente, en la figura 4.9 se visualiza que el 50% de los flujos de calor por convección están por debajo del 50% de los flujos de calor por radiación, lo mismo ocurre con el 75% de dichos resultados en el primer experimento. Este comportamiento se repite en el segundo experimento, y los calores convectivos de la tabla 4.3 son incluso menores que los de la tabla 4.2. Por ende, los flujos máxicos del primer y segundo experimento transfieren al sistema menor energía térmica que la que se dispone en el colector solar, especialmente en el segundo caso. Ambos cumplen con el balance térmico, ecuación (2.17), durante la mayor parte de cada proceso.

En las figuras 4.11 y 4.12, los flujos de calor por convección son mayores, en promedio, que los de radiación. Si aproximadamente el 68% de los valores se encuentran dentro de una desviación estándar de la media, entonces los flujos máxicos del tercer y cuarto experimento transfieren al sistema la misma o una mayor energía térmica que la que se dispone en el colector solar, según los resultados calculados. Por consiguiente, ambos casos no cumplen con el balance térmico de la ecuación (2.17), durante la mayor parte de cada proceso.

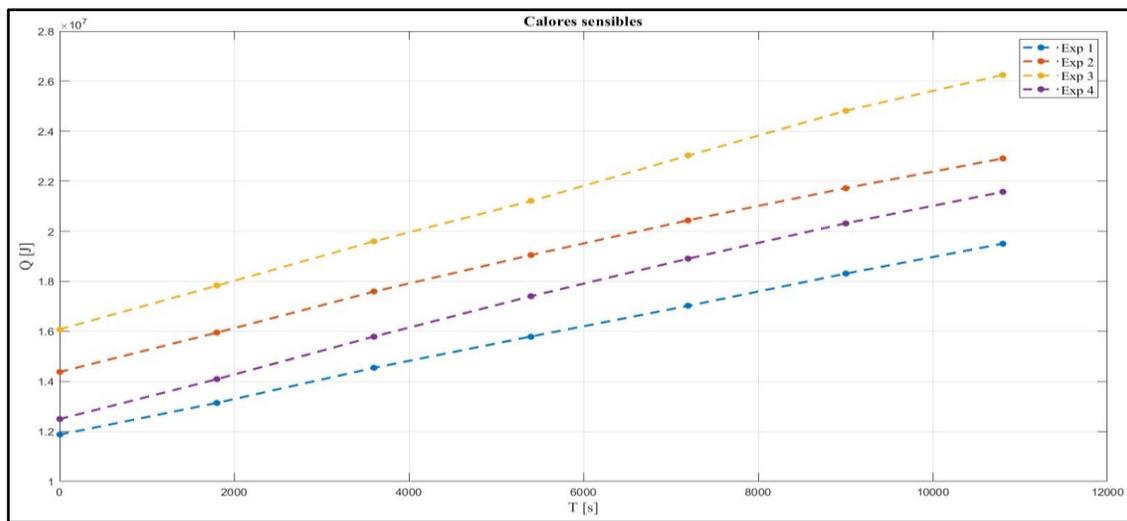


Figura 4.13 Energías internas en cada experimento.

En la figura 4.13 están los intervalos de las energías internas del tanque de almacenamiento, en donde el tercer experimento posee una mayor energía a lo largo de todo el proceso, en pocas palabras, el mayor almacenamiento energético es causado por el tercer flujo máxico; lo cual se comprobó con el valor de las pendientes en las regresiones lineales de cada experimento, dado que las gráficas en dicha figura exhiben un comportamiento lineal.

$$U = at + b \tag{4.1}$$

Donde a representa la pendiente de la razón de cambio de la energía de almacenamiento (medida en [J/s]), t es el tiempo transcurrido durante el experimento (evaluado en segundos [s]), b es la energía interna inicial del sistema (evaluada en Joules [J]), y U es la energía interna medida durante el experimento. La ecuación 4.1 es el modelo de regresión lineal que describe la energía interna promedio a partir del tiempo transcurrido, cuyas constantes dependen de cada caso, y se encuentran en la tabla 4.4. Cabe destacar que la ordenada al origen representa la energía promedio de los primeros treinta minutos del proceso, por ello la ecuación descriptiva de la energía interna en función del tiempo transcurrido de cada experimento se da únicamente mediante la pendiente respectiva, siendo la de mayor valor la del tercer experimento.

Tabla 4.5 Constantes del modelo de regresión lineal.

<i>Exp</i>	$a \left[\frac{J}{s}\right]$	$b [J]x10^{-6}$
1	708.65	11.9
2	793.97	14.5
3	951.01	16.1
4	849.84	12.6

4.3 Efectos de las condiciones ambientales.

Tabla 4.6 Flujos de calor adquirido y perdido por radiación.

<u>Flujos de Calor</u>	<u>Exp1</u>		<u>Exp2</u>		<u>Exp3</u>		<u>Exp4</u>	
	Máximo [W]	Promedio [W]						
\dot{Q}_{rad}	761.73	730.18	801.00	787.49	833.30	775.70	871.23	786.65
\dot{Q}_{PR}	75.49	57.21	132.63	110.03	120.18	90.48	190.67	129.39

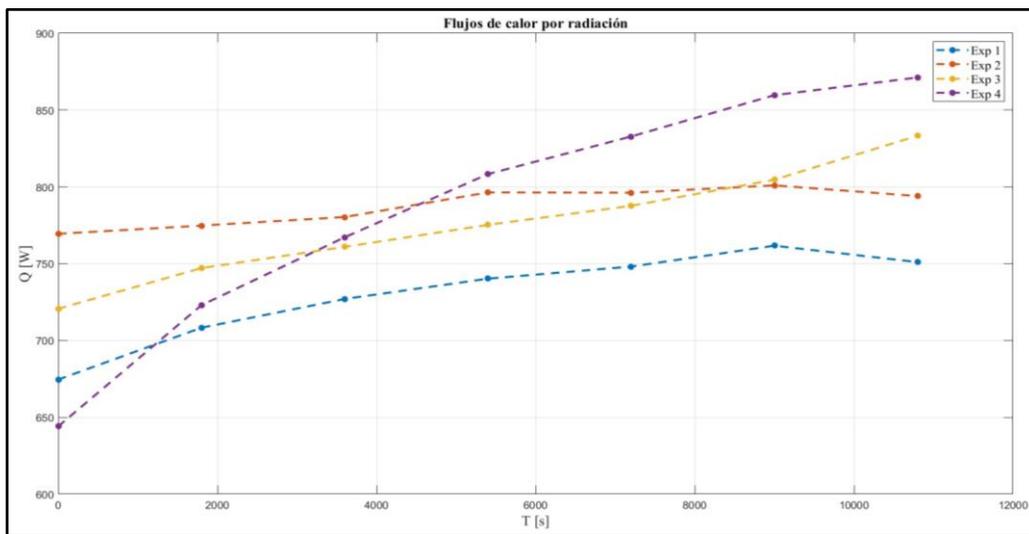


Figura 4.14 Flujos de calor por radiación en cada experimento.

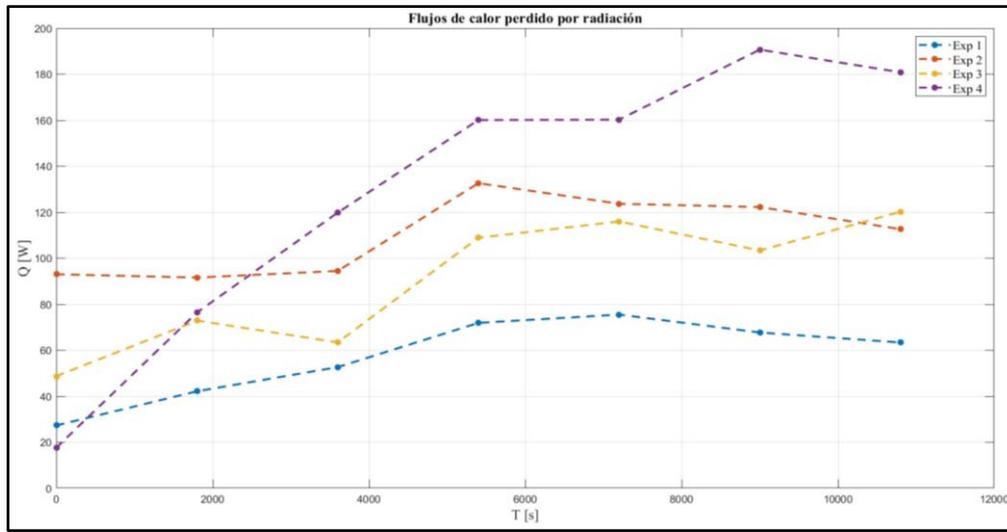


Figura 4.15 Flujos de calor perdido por radiación en cada experimento.

El comportamiento de las gráficas en la figura 4.14 se asemeja al de las gráficas en la figura 4.15, porque las pérdidas por radiación, expuestas en la tabla 4.5, son lo suficientemente menores como para no modificar significativamente el comportamiento original. En contraste a las imágenes termográficas, el experimento que adquiere y pierde menos energía térmica es el primero, mientras que aquel que capta y pierde más energía térmica corresponde al cuarto. De este modo, para este sistema termosolar, y bajo condiciones ambientales similares, a mayor energía térmica obtenida, es más probable que las pérdidas hacia el ambiente también aumenten.

4.4 Almacenamiento de energía.

Los flujos de calor neto en la figura 4.16 se calcularon a partir de valores puntuales con la ecuación (2.22), estos revelan una semejanza con las pendientes (a) de la tabla 4.4, aquellas calculadas a partir de valores promedios. En consecuencia, se corrobora que el mayor almacenamiento de energía térmica se presenta, efectivamente, en el tercer experimento.

La figura 3.40 es una foto termográfica de la vista superior del tanque de almacenamiento sin tapa, la cual se capturó aproximadamente cinco horas después de finalizar el tercer experimento, en dicha figura se visualiza claramente la utilidad del aislante térmico, puesto que presenta una temperatura puntual alta.

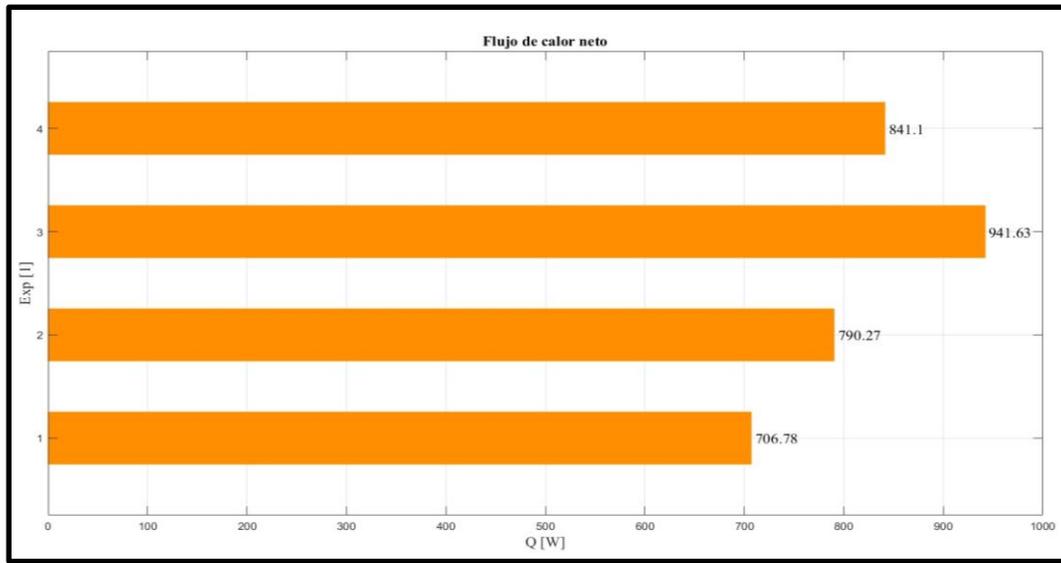


Figura 4.16 Flujos de calor neto en cada experimento.

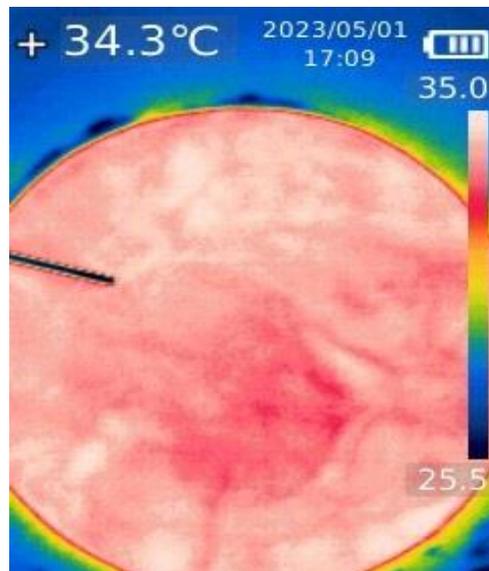


Figura 4.17 Foto termográfica superior del tanque de almacenamiento.

Para cuantificar el impacto del aislante térmico en el tanque de almacenamiento, se utilizó como temperatura inicial la final del tercer experimento, 36.14 [°C], y como temperatura final, la puntual mostrada en la figura anterior, 34.3 [°C]. Estos valores se aplicaron en el cálculo del calor sensible, según la ecuación (2.13). El resultado obtenido se dividió entre el tiempo transcurrido, en segundos, obteniendo un valor de -75 [W], correspondiente a la energía térmica perdida durante ese periodo.

Tabla 4.7 Flujos de calor involucrados en la eficiencia térmica.

<i>Flujos de Calor</i>	<i>Exp 1 [W]</i>	<i>Exp 2 [W]</i>	<i>Exp 3 [W]</i>	<i>Exp 4 [W]</i>
<i>Cámara termográfica</i>				
\dot{Q}_{rad}	1005.79	861.65	924.89	950.91
<i>Termistores</i>				
\dot{Q}_{rad}	798.43	998.87	1037.22	1687.93
\dot{Q}_n	706.78	790.27	941.63	841.1

En la tabla 4.6, para los resultados de radiación de los termistores y únicamente en los experimentos tres y cuatro, se contempló la suma de los promedios del flujo de calor perdido por radiación y por convección. ($\dot{Q}_{PR} + \dot{Q}_{conv}$) como la energía que ingresó al sistema, dado que se obtuvieron mayores aportaciones por convección. Finalmente, con los datos de la tabla anterior, se calcularon las eficiencias térmicas de cada experimento, las cuales se muestran en la figura 4.18.

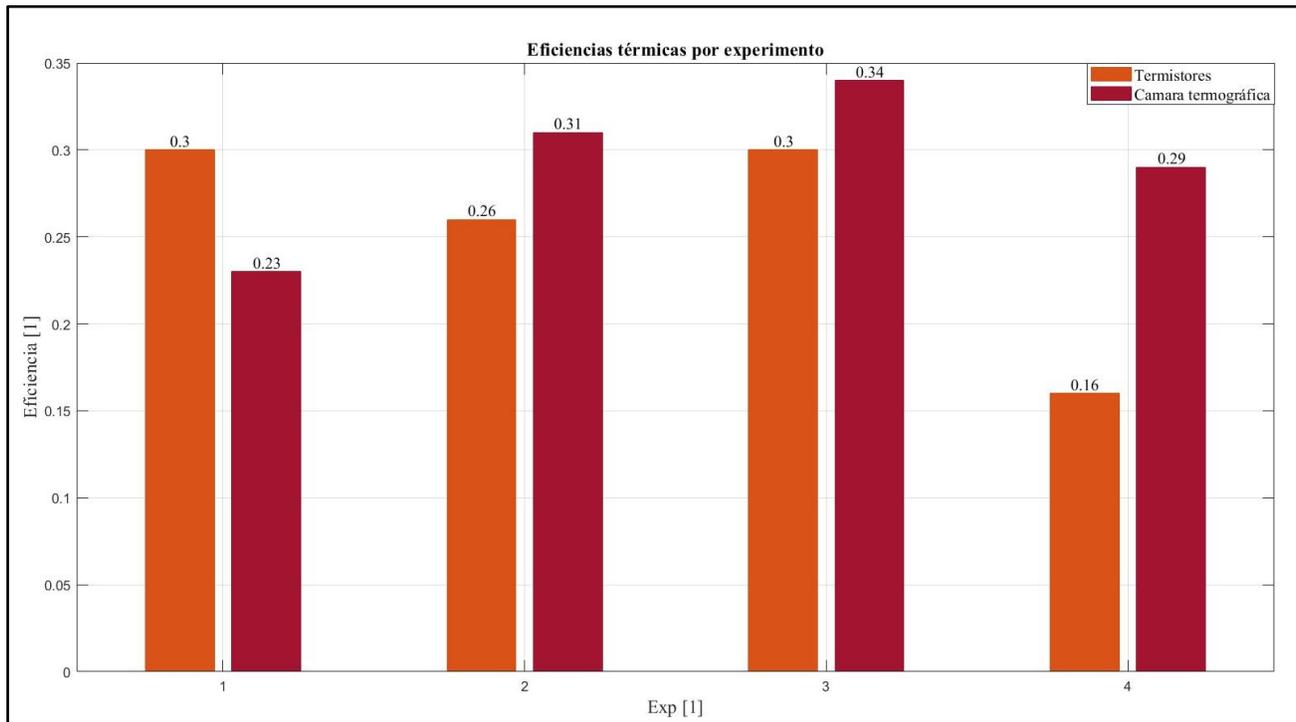


Figura 4.18 Eficiencias térmicas experimentales.

El tercer experimento demostró la mayor eficiencia térmica, según los resultados obtenidos tanto con los termistores como con la cámara termográfica. En efecto, las eficiencias experimentales son superiores a la eficiencia teórica del 22%, excepto la calculada a partir de datos continuos en el cuarto experimento, sin mencionar que la mayoría muestra un valor superior del 25%, así pues, el sistema termo-solar exhibe altas eficiencias térmicas con gastos volumétricos menores a los 6.1[L/min].



CAPÍTULO 5

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un procedimiento experimental útil para el cálculo de la ganancia energética de sistemas termosolares, en dónde se definieron las variables que intervienen dentro de su evaluación. Aquellas variables son: las temperaturas en la etapa de captación, transferencia y almacenamiento de energía térmica; el fluido de calentamiento acorde a las temperaturas alcanzadas en el sistema, principalmente, sus propiedades físicas como la densidad, calor específico, conductividad térmica, y punto de ebullición; la cantidad de flujo másico circundante; y la duración del proceso de adquisición de radiación solar.

Se analizó la interacción de dichas variables dentro del entorno experimental construido, el cuál consistió en un sistema termo-solar con tecnología de baja temperatura, cuyo colector es destinado a la climatización de piscinas. Posterior al análisis es factible concluir los siguientes puntos particulares:

1. Las imágenes termográficas de la superficie del calentador presentaron temperaturas mayores que las registradas por el termistor cuatro, lo cual se concluye como una deficiencia en la medición experimental de la temperatura superficial.
2. El balance térmico no se cumple en los últimos dos experimentos, debido a dos factores. El primero es que dichos flujos saturan al sistema de captación, reduciendo las velocidades con las que ingresa el agua, de tal forma que se adquiere mayor energía térmica. El segundo factor es la ya mencionada deficiencia de medición en la temperatura superficial.
3. El análisis del almacenamiento de energía mostró que un incremento en el flujo másico no necesariamente implica un aumento en el aprovechamiento energético. Aunque la temperatura superficial se incrementa con el aumento de agua que circula a través del colector solar, este mecanismo sólo permite incrementar la energía térmica hasta una cantidad determinada, sin tener pérdidas energéticas posteriores. Se establece que el colector solar tiene condiciones de operación óptimas, principalmente en la cantidad de flujo circundante.
4. Se concluye que el gasto volumétrico de agua adecuado para el colector solar comercial es de aproximadamente $6.1[L/min]$, ya que presenta el mejor aprovechamiento energético durante el tiempo de mayor radiación solar. Para un valor óptimo del gasto volumétrico se requiere más precisión en el método de su medición.
5. En la región experimental con una temperatura ambiental de $32 [^{\circ}C]$, o cercana a este valor, y durante los últimos diez días del mes de marzo, el sistema termosolar presenta eficiencias térmicas superiores al 25%, en otras palabras, bajo las condiciones mencionadas el sistema es altamente eficiente en términos de transferencia de energía térmica, siempre y cuando el gasto volumétrico de agua no supere el valor adecuado.

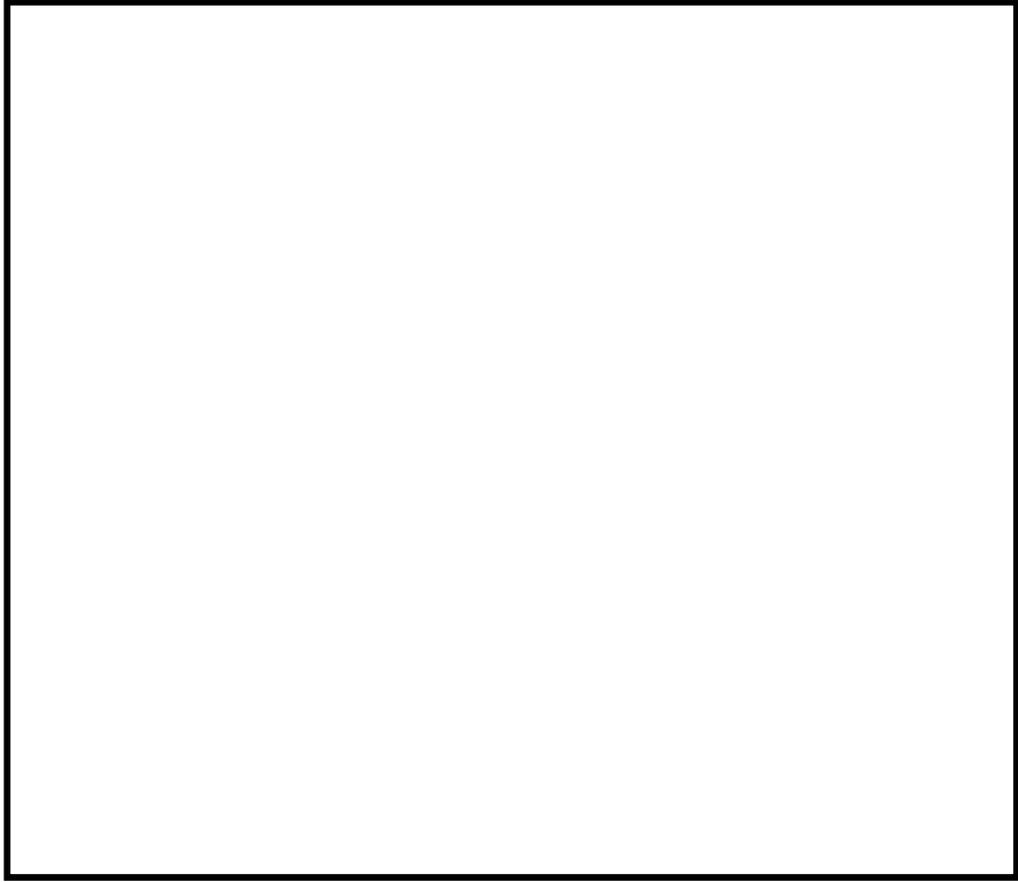
Se analizó la asociación directa que tienen las variables del modelo con el almacenamiento energético. Durante el periodo de mayor exposición solar, el flujo másico resultó ser el factor determinante en el cambio de la energía térmica del sistema. Esto quedó demostrado a través de las

diferencias de temperatura registradas en las etapas de adquisición y transferencia, evidenciando un cambio en la capacidad de almacenamiento de energía térmica.

El modelo de evaluación es útil para determinar el mejor aprovechamiento energético en los sistemas termosolares de baja temperatura que se encuentran comercialmente en la actualidad, evitando así pérdidas energéticas significativas.

5.1 Trabajo futuro.

Los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron alcanzados. No obstante, es posible mejorar el método de evaluación en trabajos futuros. El método experimental requiere ser más exhaustivo en las mediciones tanto de flujo másico como de temperaturas registradas. En vista de las dimensiones y función que presentan los sistemas termosolares con tecnología de baja temperatura, se requieren medidores de baja resolución para conocer los flujos másicos en la entrada y salida del captador, ya sea de forma indirecta con manómetros diferenciales o directamente con medidores de flujo digitales. Igualmente se requiere implementar mayores puntos de medición de temperatura en la superficie de captación para conocer de manera detallada la energía térmica adquirida. Por último, un registro constante de las temperaturas circundantes permite una mayor precisión de la energía perdida. Con los ajustes mencionados es posible determinar un balance térmico más descriptivo del proceso experimental, lo cual permitiría establecer las condiciones óptimas de sistema termosolar.



REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] Goswami, D. Y. (2015) *Principles of Solar Engineering, Third Edition*. Taylor and Francis Group, Philadelphia. Recuperado el de: <https://www.advan-kt.com/principlesofsolarengi.pdf>
- [2] Lovegrove K, Luzzi A, Soldiani I & Kreetz H. (2004). *Developing ammonia based thermochemical energy storage for dish power plants*. Solar Energy.
- [3] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.
- [4] Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. (1999) *Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta Edición*. Prentice Hall, México.
- [5] Holman, J.P. (2010). *Heat Transfer, Tenth Edition*. McGraw-Hill
- [6] (s.a.) *Table Of Emissivity Of Various Surfaces*. TRANSMETRA. Recuperado el 23 de agosto del 2024 de: https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometriethermografie/emissivity_table.pdf
- [7] Rodriguez, H. (2023, 23 de marzo). *El Sol, la estrella que sostiene la vida en la Tierra*. National Geographic España. Recuperado el 24 de junio del 2024 de: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/sol-estrella-que-sostiene-vida-tierra_18659#google_vignette
- [8] (2019, 1 de diciembre) *Tema 3 Balance Energético de la Tierra*. Centro de Investigación Mariña (CIM), Universidad de Vigo. Recuperado el 24 de junio del 2024 de: https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/05/Tema3_Balance_energ%C3%A9tico.pdf
- [9] López Cózar, J.M. (2006, octubre) *Energía Solar Térmica*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- [10] (2024) *¿Qué es la energía solar y qué beneficios tiene? Aprovechando al máximo la energía del Sol*. REPSOL. Recuperado el 25 de julio del 2024 de: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>
- [11] Santos, I., Silva, A., Straffon, A. & Maser, O. (2023). *Hacia un Programa Nacional de Calentadores Solares de Agua*. México: Pronace ecc-Conahcyt. Recuperado el 23 de agosto del 2024 de: https://conahcyt.mx/wpcontent/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_tematico_IV.pdf
- [12] Carrión, W., Murillo, W. & Montero, A. (2022, 1 de enero) *Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria*. Ingenius. Universidad Politécnica Salesiana Revista de Ciencia y Tecnología. <https://www.redalyc.org/journal/5055/505569631006/html/>
- [13] Richter, C., Teske, S., & Nebrera, J. (2009). *Energía Solar Térmica de Concentración: Perspectiva Mundial 2009*. Ámsterdam, Países Bajos: Greenpeace.
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (Encevi). Inegi. <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- [15] (2024) *Calefacción solar: qué es, tipos y beneficios*. REPSOL. Recuperado el 10 de octubre del 2024 de: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/calefaccion-solar/index.cshtml>
- [16] (s.a) *Piscinas*. ALTERTEC. Recuperado el 10 de octubre del 2024 de: <http://altertec.com/piscinas/>
- [17] (s.a.) *Calefacción solar SFBF para sistemas de calefacción por suelo radiante*. 1st SUNFLOWER ENERGY. Recuperado el 10 de octubre del 2024 de: <https://1stsunflower.com/es/Calefacci%C3%B3n-solar-SFBF-para-sistemas-de-calefacci%C3%B3n-por-suelo-radiante-pd41764485.html>

- [18] Roca, J. (2016, 12 de junio) *Las 10 plantas termosolares más grandes del mundo: EEUU y España se reparten el 90% del pastel*. El periódico de la energía. Recuperado el 16 de octubre del 2024 de: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-plantas-termosolares-mas-grandes-del-mundo-eeuu-y-espana-se-reparten-el-90-del-pastel/#comments>
- [19] Stutz, B., Le Pierrès, N., Kuznik, F., Johannes, K., Del Barrio, E. P., Bedecarrats, J. P., ... & Minh, D. P. (2017). *Storage of thermal solar energy*. Comptes Rendus. Physique, 18(7-8), 401-414.
- [20] Jaxa-Rozen, M., Bloemendal, M., Rostampour, V., & Kwakkel, J. (2016). Assessing the sustainable application of aquifer thermal energy storage. In the European geothermal congress.
- [21] ESMAP(2020, Junio) *Global Photovoltaic Power*. Washington, DC: World Bank. Recuperado el 28 de Octubre del 2024 de: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/466331592817725242/pdf/Global-Photovoltaic-Power-Potential-by-Country.pdf>
- [22] Solargis & World Bank Group (2024) *Global Solar Atlas* [Conjunto de datos interactivos]. ENERGYDATA.INFO disponible bajo la Licencia de Base de Datos Abierta (ODbL). Recuperado el 28 de Octubre del 2024 de: <https://globalsolaratlas.info/map?c=22.573438,-100.206299,6>
- [23] Contrera, M., Maser, O. & Serrano-Medrano, M. (2022, abril). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales*. Pronace ecc-Conahcyt. Recuperado el 28 de Octubre de: https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf



ANEXO

A.1. Código de calibración de termistores y obtención de datos.

Código MATLAB

```
%% Este programa se utilizó para obtener voltajes y resistencias para cuatro termistores tipo 100K NTC %%  
  
clc  
  
close all  
  
clear all  
  
%% Constantes de conversión V a R  
  
tic  
  
R01=101; R02=100.2; R03=100.3; R04=100.7; Vin=5.09;  
  
%% Duración del evento en segundos  
  
duration=7000;  
  
%% Intervalo de cada toma  
  
dt=2;  
  
%% Repetición del ciclo for  
  
r=(duration/dt);  
  
R1=[]; R2=[]; R3=[]; R4=[];  
  
%%%%%%%%%%  
  
%% Programa principal %%  
  
for c=1:r  
  
    %% Entradas analogicas del USB-6008  
  
    d=daq("ni");  
  
    addinput(d,"Dev1","ai0","Voltage");  
  
    addinput(d,"Dev1","ai1","Voltage");  
  
    addinput(d,"Dev1","ai2","Voltage");  
  
    addinput(d,"Dev1","ai3","Voltage");  
  
    TerminalConfig = "SingleEnded";
```

```

%% Número de lecturas cada segundo

d.Rate = 1;

DAQ_1=read(d,seconds(dt));

%% Lista de datos a A0

A0=DAQ_1.Dev1_ai0;
A1=DAQ_1.Dev1_ai1;
A2=DAQ_1.Dev1_ai2;
A3=DAQ_1.Dev1_ai3;

%% Conversión de voltaje a resistencia

for i=1:dt
R1(i)=((A0(i))*R01)/(Vin-(A0(i)));
R2(i)=((A1(i))*R02)/(Vin-(A1(i)));
R3(i)=((A2(i))*R03)/(Vin-(A2(i)));
R4(i)=((A3(i))*R04)/(Vin-(A3(i)));
end

clear d

end

toc

```

A.2. Resistencias variables y sus respectivas filtraciones por experimento.

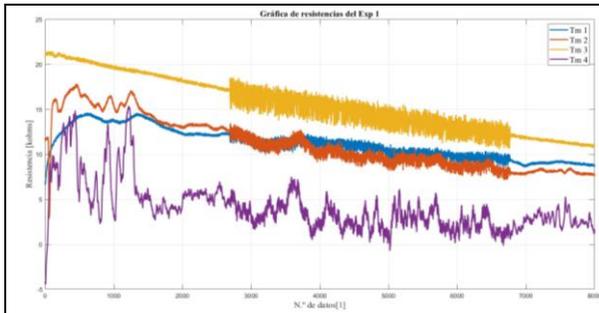


Figura A.1 Gráfica de resistencias Exp 1

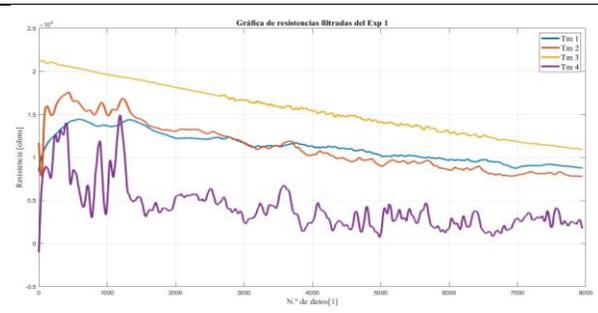


Figura A.2 Gráfica de resistencias filtradas Exp 1

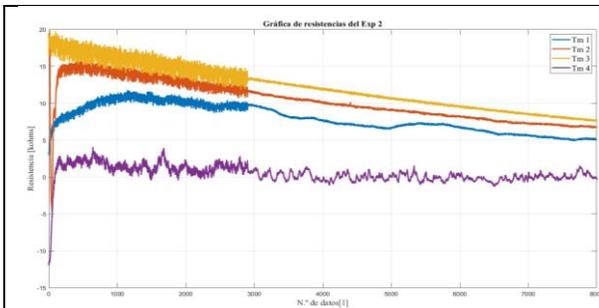


Figura A.3 Gráfica de resistencias Exp 2

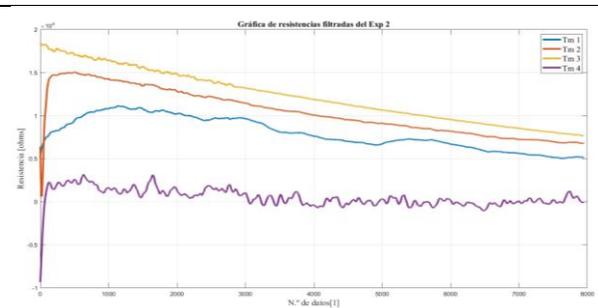


Figura A.4 Gráfica de resistencias filtradas Exp 2

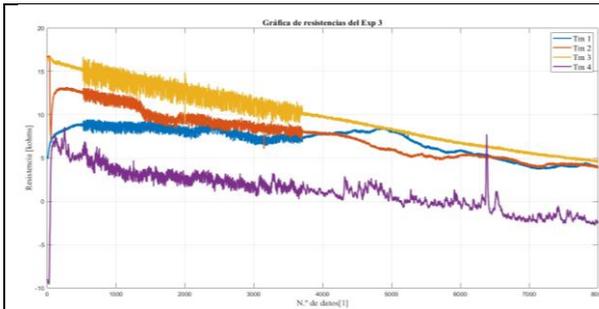


Figura A.5 Gráfica de resistencias Exp 3

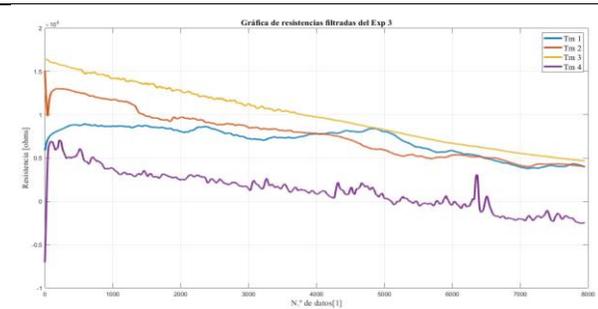


Figura A.6 Gráfica de resistencias filtradas Exp 3

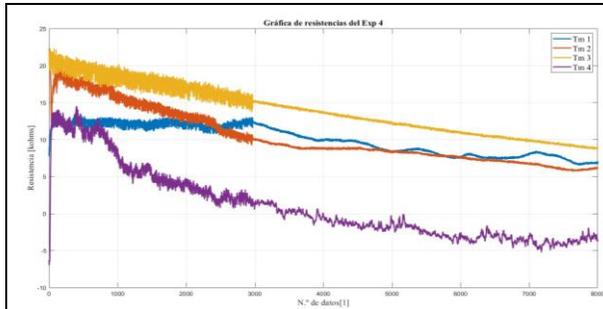


Figura A.7 Gráfica de resistencias Exp 4.

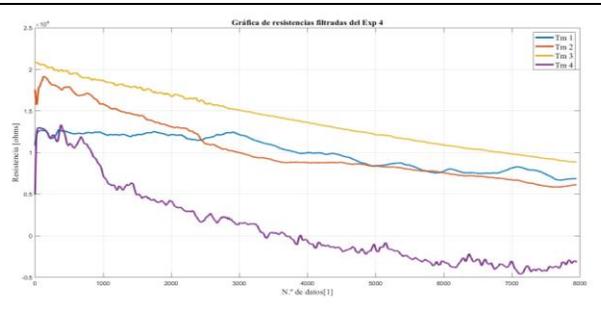


Figura A.8 Gráfica de resistencias filtradas Exp 4.

A.3. Medidas de asimetría y apuntamiento por experimento.

Tabla A.1 Valores de Asimetría y Curtosis en los flujos de calor por radiación y convección.

	<i>Coefficiente de Asimetría</i>				<i>Curtosis</i>			
	<i>Exp 1</i>	<i>Exp 2</i>	<i>Exp 3</i>	<i>Exp 4</i>	<i>Exp 1</i>	<i>Exp 2</i>	<i>Exp 3</i>	<i>Exp 4</i>
\dot{Q}_{rad}	-1.46	1.92	0.02	-0.72	5.14	23.87	2.48	2.44
\dot{Q}_{conv}	-0.40	2.40	0.63	-0.40	1.84	9.89	2.86	2.60