

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**Caracterización térmica de  
captadores solares para  
calentamiento de aire**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Energías Renovables**

**P R E S E N T A**

José Miguel Acosta Hernández

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Octavio García Valladares



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**Temixco, Mor., a 19 de junio de 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**OF/IER/LIER/096/2019**  
**ASUNTO:** Notificación de jurado y  
fecha para examen profesional.

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
**DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**  
**Presente.**

Por medio de la presente le informo que el día miércoles 19 de junio de 2019, a las 09:00 hrs., en el Instituto de Energías Renovables, el **C. JOSÉ MIGUEL ACOSTA HERNÁNDEZ**, con número de cuenta 414013919 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

***“Caracterización térmica de captadores solares para calentamiento de aire”***

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>DR. ROBERTO BEST Y BROWN</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>DR. ERICK CÉSAR LÓPEZ VIDANA</b>
<b>SUPLENTE:</b>	<b>DR. OSCAR ALFREDO JARAMILLO SALGADO</b>

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,  
**“Por mi raza hablará el espíritu”**  
Temixco, Mor., a 14 de junio de 2019

**Dr. Jorge Alejandro Wong Loya**  
**Coordinador Académico de la LIER**  
**IER-UNAM**

JAWL:mfp.



Priv. Xochicalco s/n,  
Col. Centro,  
62580 Temixco, Morelos, México  
T. 01 (777) 362 00 90  
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

## Dedicatoria

*Dedicado a mis papás, hermanos  
y hermana que me han apoyado  
incondicionalmente.*

## Agradecimientos

- A la UNAM y al IER por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional.
- Al Dr. Octavio quien me impulsó y aconsejó para el desarrollo de éste trabajo de manera satisfactoria.
- A mis profesores, quienes dieron su esfuerzo para que nuestra formación fuera la mejor.
- A mis amigos y compañeros que han sido de gran ayuda durante la licenciatura.
- A Karen, quien siempre ha confiado en mí sin importar las circunstancias.
- Al Dr. Rodolfo y mis compañeros durante las pruebas, especialmente las ingenieras Analí e Itzel, quienes me apoyaron con el desarrollo de éste trabajo.
- A mis sinodales, que han tomado su tiempo para que éste trabajo se desarrolle de la mejor manera posible.
- A mi familia por mostrar apoyo y cariño, impulsándome a ser una mejor persona día a día.
- Al proyecto 12 del CEMIE-sol, “Desarrollo de captadores, sistemas solares y sistemas autocontenidos de baja temperatura con materiales novedosos para México”.
- Al Premio PRODETES. Proyecto de Desarrollo de Tecnologías de Energía Sustentable para el Cambio Climático, PRODETES 2017: “Desarrollo de Captadores Solares de Baja y Mediana Temperatura para Calor de Proceso Industrial”, PRODETES17- PL-CCEL-000020.

---

## Resumen

Según la REN21, en su reporte global para las energías renovables, el 48 % del consumo final de energía está destinado a calentamiento de procesos y fluidos. De dicho porcentaje, solo el 27 % es representado por energía renovable, sin embargo más de la mitad es biomasa tradicional y solo un 8.4 % es brindado por las energías renovables. Esto deja un amplio panorama de aplicación para la energía solar térmica, la cual se encuentra en un estado maduro de desarrollo tecnológico.

Hablando específicamente de la energía solar térmica, para el año 2016 se cuenta con una capacidad instalada de 457.1  $GW_{th}$  de los cuales el 71.5 % corresponden a captadores de tubos evacuados, 22.1 % son captadores de placa plana, 6.1 % son captadores desnudos y solo el 0.3 % son captadores para calentamiento de aire.

Tomando en cuenta la amplia gama de aplicaciones de un captador de aire como lo son el acondicionamiento térmico de espacios, secado de alimentos, incubación, entre otras aplicaciones que requieren del calentamiento directo del aire; y la alta demanda energética para generación de calor, así como el recurso energético disponible a nivel mundial, los captadores solares para calentamiento de aire presentan una gran oportunidad para incrementar tanto su capacidad instalada y la generación de calor a través de fuentes renovables de energía.

Los captadores solares para calentamiento de aire presentan un funcionamiento similar a los captadores solares de agua, sin embargo el hecho de cambiar el flujo de trabajo demanda la caracterización del sistema, lo cual nos permitirá realizar el dimensionamiento de captadores para diferentes usos con base en el comportamiento de temperaturas y eficiencias bajo condiciones típicas establecidas.

Los estándares de calidad y gestión para realizar las pruebas experimentales de un captador solar están dadas por la ISO 9806:2013 “captadores solares térmicos. Métodos de ensayo”, en la cual se establecen las condiciones para las pruebas experimentales, así como el manejo de datos.

En el presente trabajo se muestran los resultados de las pruebas experimentales para las pruebas de curvas de eficiencia térmica instantánea, factor modificador del ángulo de incidencia y caída de presión.

## Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Panorama de las energías renovables	5
1.1.1. A nivel global	5
1.1.2. En México	6
1.2. Planteamiento de problema.	8
1.3. Objetivos	10
1.4. Hipótesis	10
<b>2. Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Antecedentes	11
2.2. Conceptos generales	13
2.3. Principio de funcionamiento y clasificación	14
2.4. Comparación entre agua y aire como fluidos de trabajo	14
2.5. Componentes del captador solar para calentamiento de aire.	15
2.6. Ecuación de la eficiencia térmica instantánea.	18
2.7. Factor modificador del ángulo de incidencia	20
2.8. Caída de presión	21
<b>3. Metodología</b>	<b>22</b>
3.1. Marco normativo	22
3.1.1. Ángulo de inclinación	23
3.1.2. Irradiancia solar difusa y reflejada	23
3.1.3. Protocolo de operación	23
3.1.4. Condiciones de prueba	24
3.2. Instrumentación, dispositivos y elementos del sistema	26
<b>4. Resultados</b>	<b>29</b>
4.1. Curvas de eficiencia térmica instantánea	29
4.1.1. Curvas de eficiencia térmica instantánea para un captador	29
4.1.2. Curvas de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie	33
4.1.3. Curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie	37
4.1.4. Comparación de eficiencias térmicas instantáneas para los diferentes arreglos	41
4.1.5. Rangos de temperatura	43
4.2. Prueba del factor modificador del ángulo de incidencia	44
4.3. Caída de presión	46
<b>5. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>7. Apéndices</b>	<b>53</b>
7.1. Apéndice A: Especificaciones técnicas del captador solar	53

## Índice de figuras

1.	Estimación de energía renovable en el consumo total a nivel mundial. REN 21, (2017). Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable. Recuperado de [2] . . .	5
2.	Generación de energía en México por fuente. SENER, (2017). Recuperado de [4] . . .	7
3.	Generación de energía en México por fuente renovable. SENER, (2017). Recuperado de [4] . . . . .	7
4.	Energía renovable en el consumo final energético por sector, 2015. REN 21, 2018. Recuperado de [3] . . . . .	8
5.	Mapa de valores de ir radiación directa normal para México. Recuperado de [6] . . .	9
6.	Tipos de circulación de aire. Recuperado de [15]. . . . .	15
7.	Diagrama del captador solar para calentamiento de aire. Recuperado de [16] . . . . .	16
8.	Esquema de un difusor para el captador de aire. Recuperado de [16] . . . . .	17
9.	Ejemplo de una curva de eficiencia térmica instantánea . . . . .	20
10.	Ejemplo del esquema de un sistema de circuito abierto. Recuperado de [7] . . . . .	22
11.	Representación esquemática de la medición de caída de presión. Recuperado de [7]. . .	25
12.	Fotografía del banco de pruebas experimentales. . . . .	27
13.	Fotografía del variador de frecuencia y el flujómetro . . . . .	28
14.	Fotografía del medidor de presión diferencial . . . . .	28
15.	Fotografía del piranómetro Kipp & Zonen CMP6. . . . .	28
16.	Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo bajo. . . . .	30
17.	Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo medio. . . . .	30
18.	Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo alto. . . . .	31
19.	Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a diferentes flujos . . . . .	32
20.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a diferentes flujos . . . . .	33
21.	Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo bajo. . . . .	34
22.	Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo medio. . . . .	34
23.	Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo alto. . . . .	35
24.	Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea para dos captadores conectados en serie a diferentes flujos . . . . .	36
25.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a diferentes flujos . . . . .	37
26.	Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo bajo. . . . .	38
27.	Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo medio. . . . .	38
28.	Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo alto. . . . .	39
29.	Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea para tres captadores conectados en serie a diferentes flujos . . . . .	40
30.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos . . . . .	40
31.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos . . . . .	41

---

32.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos . . . . .	42
33.	Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos . . . . .	42
34.	Ajuste lineal de la prueba de modificador de ángulo de incidencia. . . . .	44
35.	Modificador de ángulo de incidencia . . . . .	45
36.	Caídas de presión de un captador . . . . .	46
37.	Caídas de presión de dos captadores en serie . . . . .	47
38.	Caídas de presión de tres captadores en serie . . . . .	47
39.	Caídas de presión de uno, dos y tres captadores en serie . . . . .	48
40.	Comparación de caída de presión en los captadores y en el difusor. . . . .	48

---

## Índice de tablas

1.	Instrumentos de medición y dispositivos utilizados para realizar las pruebas experimentales. . . . .	27
2.	Diferentes flujos para las pruebas experimentales de eficiencia térmica instantánea . .	29
3.	Eficiencias térmicas instantáneas y coeficientes para un captador a diferentes flujos . .	31
4.	Eficiencia térmica instantánea y coeficientes para dos captadores conectados en serie a diferentes flujos . . . . .	36
5.	Eficiencia térmica instantánea y coeficientes para tres captadores en serie a diferentes flujos . . . . .	39
6.	Rango de temperaturas durante las pruebas de eficiencia térmica instantánea. . . . .	43
7.	Dimensiones, materiales y condiciones ambientales del calentador solar para de aire. .	53

# 1. Introducción

## 1.1. Panorama de las energías renovables

### 1.1.1. A nivel global

Actualmente las energías renovables se establecen como una oportunidad de abasto energético tanto en zonas urbanas como en zonas rurales, donde las instalaciones y ubicación no hacen viable la instalación de servicios públicos básicos como lo es la electrificación y el abasto de combustibles fósiles.

Durante los últimos años nos hemos encontrado con un constante crecimiento de diferentes fuentes energéticas, el cual ha llegado al punto en el que las energías renovables brindan 19.3% de la energía total consumida a nivel mundial (figura 1)[1]. Dicho crecimiento es impulsado por diversos factores como nuevas políticas energéticas a niveles nacionales, seguridad energética y cuestiones económicas, ambientales y de salud.

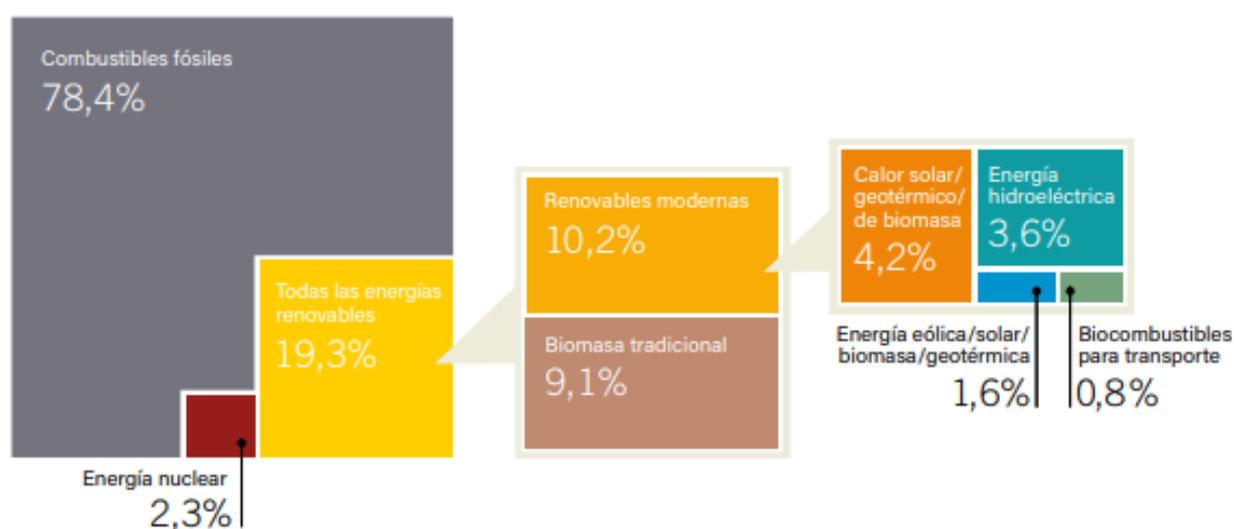


Figura 1: Estimación de energía renovable en el consumo total a nivel mundial. REN 21, (2017). Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable. Recuperado de [2]

Gracias al constante avance científico y tecnológico en el campo energético, existe una depreciación que hace cada vez más fácil la difusión y el acceso a nuevas tecnologías que permitirán que las energías renovables tengan cada vez un lugar más importante en el mercado, sobre todo en países en vías de desarrollo. A pesar del desarrollo y abaratamiento de las energías renovables para el año 2016 hubo una inversión menor a la del año 2015, aumentando el total de la capacidad eléctrica instalada de 785 a 921 GW (sin incluir la energía hidráulica de gran escala)[1].

En cuanto a la energía Solar Térmica el total de la capacidad instalada en el año 2016 fue de 457.1  $\text{GW}_{th}$  que corresponden a 653 millones de  $\text{m}^2$  de los cuales el 71.5% son captadores de tubos evacuados (327.1  $\text{GW}_{th}$  correspondientes a casi 467 millones de  $\text{m}^2$ ), 22.1% son captadores de placa plana (101.1  $\text{GW}_{th}$  correspondientes a 144 millones de  $\text{m}^2$ ), el 6.1% son captadores desnudos (27.7  $\text{GW}_{th}$  correspondientes a casi 40 millones de  $\text{m}^2$ ) y solo el 0.3% son captadores para calentamiento de aire (1.2  $\text{GW}_{th}$  correspondiente a casi 2 millones de  $\text{m}^2$ )[3].

Específicamente los captadores solares para calentamiento de aire se han desarrollado los últimos 30 años en las regiones de Estados Unidos y Japón, principalmente con fines de calefacción en escuelas, entidades municipales, militares, comerciales e industriales así como en usos con fines residenciales y de agricultura enfocada a secado de alimentos y madera. Comúnmente los captadores de aire se montan sobre paredes para evitar acumulamiento de nieve y tener una mayor ganancia de radiación incidente durante épocas de invierno. A pesar de que es posible almacenar calor la mayoría de los usuarios prefiere no hacerlo para minimizar costos, teniendo así entre un 20 y 30 % de la demanda de calor total cubierta por dichos sistemas. Los principales países con capacidad instalada de captadores de aire son Australia, Canadá, China, Japón y Estados Unidos[3].

A pesar de dicho crecimiento y de las ventajas que presenta la energía térmica solar y el tipo de requerimiento energético a nivel mundial es importante seguir contribuyendo en la transición energética, dejando de lado el uso de biomasa tradicional y quema de combustibles fósiles para la generación de calor en diferentes sectores. Es por eso que a nivel internacional se están desarrollando diferentes legislaciones como incentivos financieros y fiscales, préstamos y donaciones, enfocándose principalmente en el sector residencial.

### 1.1.2. En México

La geolocalización de México favorece ampliamente el desarrollo de las energías renovables, gracias a sus condiciones meteorológicas. Se tienen diversas fuentes energéticas renovables explotables a partir del sol, viento, los recursos hídricos y geotérmicos como para satisfacer en gran parte la demanda energética del país. De igual manera se cuenta con los recursos económicos y humanos para llevar a cabo procesos que van desde la investigación hasta el desarrollo de nuevas y mejores tecnologías cada vez más sustentables. Aunado a esto se deben generar nuevas políticas en pro de las energías renovables tales como incentivos, marcos regulatorios y financiamiento que permita el crecimiento de las renovables en el país y con ello apuntar a un futuro más sustentable y seguro, energéticamente hablando.

A pesar de que existen los diferentes tipos de recursos, en México el sector que mayor consumo energético tiene es el transporte con el 46.8 % para el año 2016 [4]. Lo cual marca claramente una fuerte dependencia de la quema de combustibles fósiles en el sector transporte. Dado las complicaciones que existen en el sector lo indicado es pensar sectores en los que las energías renovables representen un ahorro energético en un periodo de tiempo menor.

No solo el sector transporte es dependiente de la energía generada a partir de combustibles. Como se muestra en la figura 3 para la generación de energía en México en el año 2017, el 78.92 % es a partir de combustibles fósiles[5]. Cabe destacar que a diferencia del sector transporte, para la generación de energía eléctrica en el país ya hay una participación de las energías renovables y de otras energías limpias <sup>1</sup> con el 15.66 % y el 5.42 %, respectivamente[5].

---

<sup>1</sup>Nuclear, coenergación eficiente, frenos regenerativos y licor negro

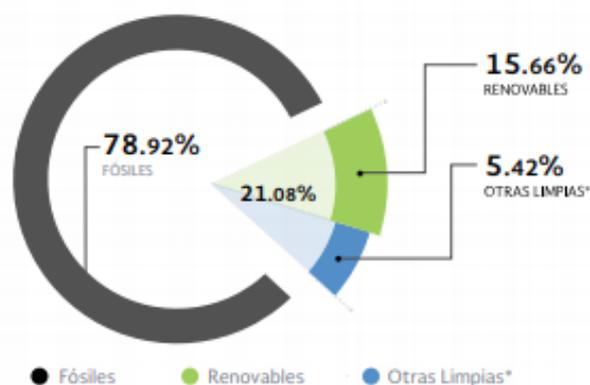


Figura 2: Generación de energía en México por fuente. SENER, (2017). Recuperado de [4]

Para la generación de electricidad por medio de energía renovable, como se muestra en la figura 3, podemos observar que la mayor parte es aportada por la energía hidroeléctrica. Enseguida se encuentra la energía eólica, la cual no tuvo gran crecimiento durante el año 2017 por el mantenimiento de algunos parques eólicos en Oaxaca debido a los daños del sismo del 7 de septiembre del mismo año, aunado a que la línea de transmisión de energía que permitiría el crecimiento de la capacidad de producción se canceló. Posteriormente se encuentra la energía Geotérmica, la cual a pesar de que la generación decreció en los últimos años, para finales del año 2016, mantuvo a México como el 5to país a nivel mundial con mayor capacidad instalada. Después se encuentra la generación a partir de bagazo de caña y el biogás y finalmente la energía solar fotovoltaica, la cual creció 5 veces más del año 2016 al 2017, gracias a los sistemas de generación distribuida.[4]

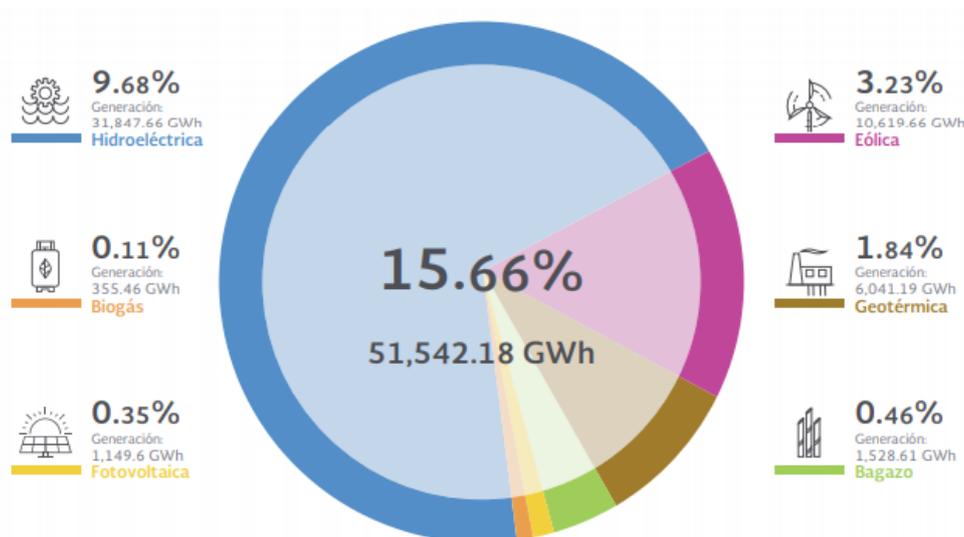


Figura 3: Generación de energía en México por fuente renovable. SENER, (2017). Recuperado de [4]

Por último, para la energía solar térmica se han desarrollado diversos programas de promoción, principalmente pensando en el calentamiento de agua en el sector residencial. Entre otros proyectos se destacan el PROCALSOL, Hipoteca verde, FIRCO en el sector agroindustrial, entre otros.

México cuenta con un total de capacidad instalada de captadores solares de agua de 2,369.7 MW<sub>th</sub>

(correspondientes a 3.3 millones de  $m^2$ ) para el año 2016. En México sobresale el uso de la tecnología de captación de placa plana con 919.2  $MW_{th}$  (correspondientes a 1.3 millones de  $m^2$ ) instalados, le siguen en proporciones similares los captadores desnudos con 722.9  $MW_{th}$  (correspondientes a 1.03 millones de  $m^2$ ) y la tecnología de tubos evacuados con 721  $MW_{th}$  (correspondientes a 1.03 millones de  $m^2$ ).

En el país también se ha promovido el uso de captadores solares para calentamiento de aire, principalmente en procesos de secado de alimentos, sin embargo esta aplicación apenas cuenta con un total de 6.6  $MW_{th}$  de capacidad instalada (correspondientes a 9,525  $m^2$ ), divididos en 0.5  $MW_{th}$  (correspondientes a 752  $m^2$ ) para captadores desnudos y 6.1  $MW_{th}$  (correspondientes a 8,773  $m^2$ ) para captadores con cubierta. [3]

## 1.2. Planteamiento de problema.

La energía solar térmica es aquella que aprovecha la irradiación proveniente del sol para generar y transferir energía mediante un medio portador o flujo de trabajo, ya sean aceites térmicos, sales disueltas, etilenglicoles, etc. principalmente agua o aire. Dicha energía se transfiere aprovechando de las propiedades ópticas y térmicas de algunos materiales en un sistema de captación, generando condiciones en las que se pueden alcanzar temperaturas que van desde pocos grados por encima de la temperatura ambiental hasta los  $500^{\circ}C$  en algunas tecnologías de concentración. Con este rango de temperaturas existe una gran gama de aplicaciones en diferentes sectores como el residencial, comercial e industrial.

Según la REN21 en su reporte global para las energías renovables (figura 4) el 48% del consumo final de energía está destinado a calentamiento de procesos y fluidos. De dicho porcentaje, solo el 27% es representado por energía renovable, sin embargo más de la mitad es biomasa tradicional y solo un 8.4% es brindado por las energías renovables modernas<sup>2</sup> (REN 21, 2018). Esto deja un amplio panorama de aplicación para la energía solar térmica, la cual se encuentra en un estado maduro de desarrollo tecnológico.

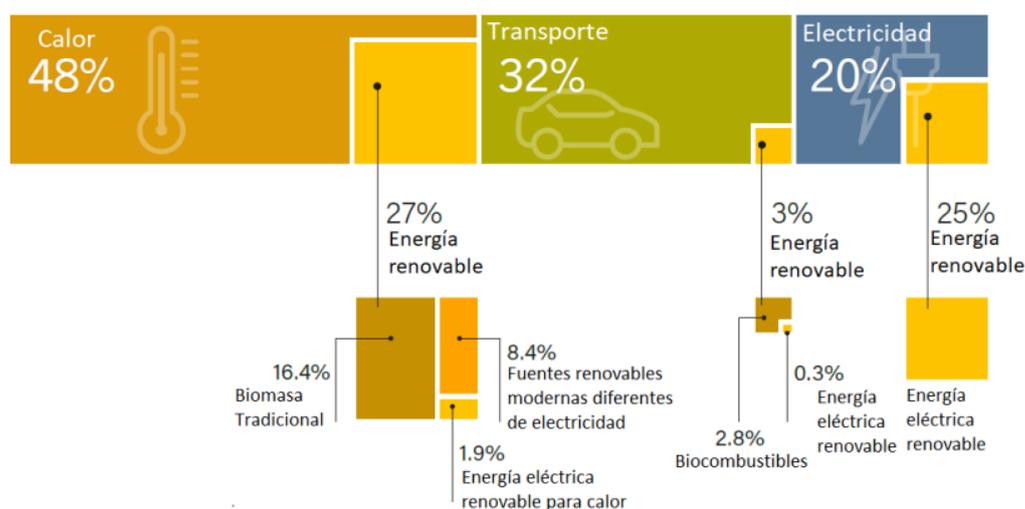


Figura 4: Energía renovable en el consumo final energético por sector, 2015. REN 21, 2018. Recuperado de [3]

<sup>2</sup>Energías renovables modernas para calentamiento: incluye biocombustión moderna, uso directo de la energía geotérmica y solar térmica

La irradiación es la forma en la que podemos medir el potencial de energía solar con la que cuenta un territorio, dada en  $kWh/m^2$ . México cuenta con un recurso solar mayor al de la media mundial, con irradiación promedio de  $5.5 kWh/m^2$  y hasta  $8 kWh/m^2$ , en la región noroeste del país durante las épocas de verano (Ver figura 5). Esta condición propicia el crecimiento de la capacidad instalada de energía térmica, la cual en México para 2014, era de 1,979 MW entre calentadores solares de agua<sup>3</sup> (1,972 MW) y calentadores solares para calentamiento de aire (6.6 MW) [6].

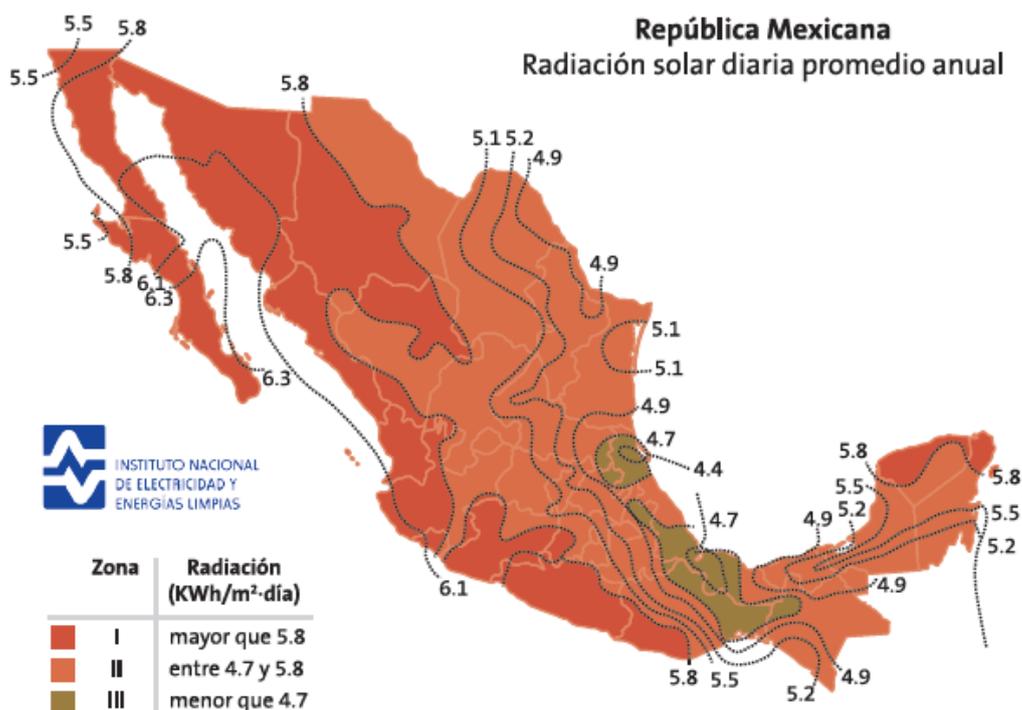


Figura 5: Mapa de valores de ir radiación directa normal para México. Recuperado de [6]

A pesar de que existe una baja demanda en calentadores de aire, se tiene una gran gama de aplicaciones basadas en el acondicionamiento térmico de espacios, tales como: secado de alimentos, incubación, agricultura protegida, salas climatizadas, calentamiento de espacios habitacionales y laborales, entre otros. En dichas aplicaciones, el aire puede calentarse de manera directa lo cual brinda una gran oportunidad para incrementar la capacidad instalada de captadores de aire.

Cabe mencionar que un sistema de calentamiento de aire tiene prácticamente los mismos elementos que presenta un sistema de calentamiento de agua, sin embargo el flujo de trabajo cambia. Dicho cambio genera la necesidad de realizar la caracterización del sistema, la cual nos proporcionará un comportamiento de la temperatura y eficiencia térmica instantánea en condiciones típicas establecidas, lo que nos permitirá realizar el dimensionamiento de captadores para diferentes aplicaciones.

Los estándares de calidad y gestión para realizar las pruebas experimentales de un captador solar están dadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés). Específicamente en la ISO-9806 2013 “Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo” [7] se establecen las condiciones para las pruebas experimentales, así como el tratamiento de los datos para llevar a cabo la caracterización mencionada anteriormente.

<sup>3</sup>En cuanto al tipo de tecnología en calentadores solares de agua, predomina el uso de captadores planos, seguido de captadores desnudos y tubos evacuados

### 1.3. Objetivos

#### Objetivo general

Realizar la caracterización térmica de un sistema de captadores solares para calentamiento de aire mediante parámetros obtenidos a partir de las curvas de eficiencia térmica instantánea y el factor modificador del ángulo de incidencia.

#### Objetivos específicos:

- Caracterización de la eficiencia térmica instantánea de una serie de captadores solares de aire apegándose a los protocolos de la norma ISO 9806:2013 “Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo” a través de las pruebas experimentales desarrolladas.
- Determinar la eficiencia térmica instantánea de cada captador bajo diferentes condiciones de operación.
- Obtener la caída de presión para las diferentes condiciones de operación de los captadores de acuerdo a los protocolos establecidos por la norma ISO 9806:2013 “Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo”.
- Analizar el factor modificador de ángulo de incidencia y conocer el cambio de eficiencia térmica instantánea respecto al ángulo de inclinación de la radiación incidente sobre la superficie del captador.
- Determinar los cambios que existen al comparar las mediciones del sistema operando con uno, dos y tres captadores conectados en serie a diferentes flujos máxicos de operación.

### 1.4. Hipótesis

Los captadores solares para calentamiento de aire pueden ser una buena solución para dar energía térmica a espacios y sistemas de secado, para lo cual se debe conocer el comportamiento térmico de un sistema de captadores solares de aire conectados en serie, mediante la caracterización de sus curvas de eficiencia térmica instantánea siguiendo los protocolos de la norma ISO 9806:2013 captadores solares térmicos. Métodos de ensayo.

Para llevar acabo estos objetivos, en el capítulo 2: Marco teórico se exponen aspectos fundamentales como lo son los conceptos generales, antecedentes, principio de funcionamiento de los captadores, etc. así como la teoría de la ecuación de la eficiencia térmica instantánea y las pruebas de caída de presión y factor modificador del ángulo de incidencia.

En el capítulo 3: Metodología se describe el marco normativo y los protocolos de operación dados por la norma para la realización de las pruebas experimentales.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de las pruebas experimentales de eficiencia térmica instantánea, caída de presión y factor modificador del ángulo de incidencia.

## 2. Marco teórico

El presente capítulo se muestran algunos antecedentes haciendo énfasis en los captadores solares para calentamiento de aire. Asimismo se abarcarán aspectos que van desde el principio de funcionamiento, componentes y las ecuaciones que describen la eficiencia térmica instantánea y el factor modificador del ángulo de incidencia.

### 2.1. Antecedentes

Históricamente uno de los principales usos para los captadores solares de aire ha sido la calefacción solar. Fue hacia los años de 1880 cuando Edward S. Morse, registró el primer uso de captadores solares para calefacción doméstica. Fue a principios de 1882 que el primer calentador solar de aire de Morse se instaló en el Museo Peabody de Salem. El captador se encontraba junto a un muro al exterior del museo, era una caja caliente de aproximadamente 4 metros de altura y 1.20 metros de ancho. Dicha caja usaba una chapa de hierro corrugado negro como placa absorbedora, el muro se encargaba de encerrar la caja caliente por detrás y por arriba la cubierta era de vidrio. Morse comprobó que la temperatura aumentó  $15^{\circ}\text{C}$  tras pasar por la caja caliente, sin embargo el cambio de temperatura al interior del museo era a penas perceptible.

Más adelante, Morse optó por introducir algunas mejoras a su diseño, construyendo otro captador, pero ésta vez sustituyó la chapa corrugada por pizarra y la lámina de vidrio la colocó perpendicular al suelo. Con el nuevo diseño se obtuvieron resultados de incrementos de temperatura de hasta  $11^{\circ}\text{C}$  al interior de su estudio, que es donde instaló su segundo diseño.

Morse construyó su último calentador en el Ateneo, en Boston. No era más que una réplica que el que uso en su estudio, pero con medidas de 12 metros de alto, 2 metros de ancho, teniendo una superficie de calentamiento de  $24\text{ m}^2$ . A pesar de que existía una gran pérdida de calor por una claraboya en el techo, el dispositivo de Morse ayudó al Ateneo a ahorrar de 19 a 38 kg de carbón diarios. [8]

Medio siglo después, en 1938 el Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T. por sus siglas en inglés) financió un proyecto en el que se abordó la viabilidad técnica y económica de tener calefacción totalmente basada en energía solar. Para el desarrollo del proyecto se construyó un edificio con función de laboratorio experimental en el que se instalaron 14 captadores planos sobre la cubierta, con una inclinación de  $20^{\circ}$  respecto a la horizontal ocupando una superficie de  $38\text{ m}^2$ . El agua caliente era bombeada a un depósito de 66,000 litros de capacidad ubicado en el sótano el cual contaba con una capa de aislamiento de 60 cms.

A pesar de que durante el invierno del año 1940 se mantuvo una temperatura mínima de  $23^{\circ}\text{C}$  en el laboratorio, los resultados del estudio económico fueron desfavorables debido a la dependencia de captación durante todo el año, el gran volumen de almacenamiento y el costo de los captadores. En el año 1943 designaron a George Löf como director de un proyecto de sistemas de calefacción solar eficaces y económicos.

Fue Löf quien pensó en que lo correcto fuera un sistema de calefacción con aire como flujo de trabajo, ya que en los captadores solares de aire no existirían problemas de rotura en las tuberías por efectos de congelamiento, además de que tampoco habría corrosión o infiltraciones. Se desarrolló un captador totalmente de vidrio en el que debajo de una doble tapa había varias láminas de vidrio pintadas de negro parcialmente empalmadas. El sistema fue instalado en la casa de Löw (no había laboratorio de experimentación dado el parón debido a la segunda guerra mundial), la casa contaba antes con un

sistema de calefacción alimentado por gas, el cual funcionaba como calentador de respaldo cuando el calor solar era insuficiente.

Durante el primer invierno, el sistema de calefacción brindó una cuarta parte del calor requerido. Posteriormente se cambió el material de almacenamiento de calor alcanzando una tercera parte de calor requerido durante el invierno del siguiente año. Aunque los resultados fueron convincentes (teniendo en cuenta que la casa de prueba tenía una superficie de  $100 \text{ m}^2$ ), las láminas de vidrio tenían algunas fracturas debido a la dilatación por calor y el sistema de calefacción solar tuvo que ser removido. En aquel entonces el combustible era lo suficientemente barato como para que alguien invirtiera en un sistema solar, además del escaso conocimiento de dichos sistemas en caso de requerir asistencia técnica, no obstante Löff demostró que la energía solar era suficiente para construir un sistema de calefacción pasivo. [8]

Además de la calefacción de espacios interiores con ayuda de calentadores solares de aire existe una gran gama de aplicaciones, las cuales requieren aire caliente como lo son procesos de incubación, criaderos de aves y reptiles y principalmente el secado de alimentos. Existen diversos casos en las que se usan captadores de aire para precalentar el aire que va a ingresar a una cabina, invernadero o espacio de secado de alimentos.

Uno de los casos sobresalientes en cuanto al secado de productos agropecuarios en México es la planta solar deshidratadora en el estado de Zacatecas [9]. La planta piloto cuenta con un terreno de  $3000 \text{ m}^2$ , una nave industrial de  $400 \text{ m}^2$  que cuenta con túnel de secado con capacidad de hasta cuatro toneladas de producto y espacios para un futuro laboratorio de secado y oficinas.

En cuanto al suministro de energía térmica se cuenta con un sistema de gas LP de respaldo y diversas aplicaciones de la energía solar térmica, incluyendo 40 captadores solares de placa plana para el calentamiento de agua y 48 captadores solares para el calentamiento directo de aire, permitiendo una generación de energía térmica versátil.

Comercialmente existen diferentes empresas que actualmente desarrollan, dimensionan y/o instalan sistemas de captadores de aire, ya sea para calefacción o secado de alimentos. Algunos ejemplos son:

- Grammer Solar [10]: empresa alemana creada en el año 1977 dedicada al diseño de proyectos solares fotovoltaicos y térmicos, además de la fabricación de captadores solares para calentamiento de aire. Para el año 2014 Grammer Solar habría producido más de  $250,000 \text{ m}^2$  de captadores de aire, instalados en 43 países diferentes, además de tener diferentes sedes en países como Chile, Francia y España.
- SolarWall by Conserval Engineering inc.[11]: Conserval Engineering es una empresa canadiense fundada en 1977, la cual en 1985 comenzó a centrarse en proyectos energéticos industriales y de calefacción solar creando SolarWall, abarcando aspectos que van desde el diseño de sistemas, hasta la fabricación de la tecnología. La tecnología SolarWall está distribuida por Canadá, Estados Unidos, Europa y Asia. Además trabaja para empresas privadas tales como la NASA, Fedex, Ford, Wal-Mart, entre otros.
- SAECSA[12]: es una empresa mexicana ubicada en el estado de Puebla, fundada en 1995. La empresa se dedica al desarrollo de proyectos en las líneas de energía solar fotovoltaica, termosolar y arquitectura solar. En cuanto a la energía solar térmica, SAECSA fabrica sistemas para calentamiento de agua, deshidratadores solares, hornos solares, sistemas de calefacción solar y sistemas termosolares industriales.
- Módulo Solar [13]: Empresa Mexicana fundada en el año 1975 en el Estado de Morelos. La em-

presa se dedica a la fabricación e instalación de sistemas solares térmicos, siendo reconocida como empresa líder en su rama en México. Actualmente la empresa cuenta con más del equivalente a 250,000  $m^2$  de calentadores solares fabricados e instalados, exportando sus productos a países como Guatemala, Costa Rica, Chile, Argentina, Colombia, España, etc.

Como se mencionó anteriormente la norma utilizada en el presente trabajo es la ISO-9806 2013 “Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo”, la cual define los procedimientos para probar el rendimiento, la fiabilidad, la durabilidad y la seguridad de los captadores solares para calentamiento de fluidos en condiciones definidas y repetibles.

La norma contiene métodos de prueba de rendimiento para diferentes condiciones, ya sean pruebas en interiores con irradiancia solar y velocidad de viento simuladas, ó como en nuestro caso, en exteriores con irradiancia solar natural y con velocidad de viento natural o simulada. Asimismo las pruebas al exterior se pueden realizar bajo condiciones de estado estable o cuasi dinámicas. [7]

La norma incluye métodos de prueba para la caracterización del rendimiento térmico de captadores solares en estado estable y cuasi dinámicos para captadores solares para calentamiento de líquidos con cubierta de cristal y captadores solares desnudos; también incluye los métodos de prueba de caracterización de rendimiento térmico en estado estable para captadores solares para calentamiento de aire, ya sean con cubierta de cristal o desnudos y sistemas de circuito abierto o cerrado.[7]

## 2.2. Conceptos generales

Es importante definir algunos conceptos especializados sobre energía solar térmica que son utilizados comúnmente a lo largo de este trabajo.

**Irradiancia:** Se refiere a la energía que incide instantáneamente sobre una superficie. Las unidades para la irradiancia son  $W/m^2$ . [14]

**Irradiación:** Es la cantidad de energía por unidad de área ( $J/m^2$ ) que incide durante un periodo dado, siendo así la integral de la irradiancia respecto un periodo de tiempo. [14]

**Tiempo solar:** Es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol en el cielo. [14]

**Mediodía solar:** ocurre cuando el Sol se encuentra en su punto más alto en el cielo. Esto sucede cuando el Sol cruza lo que se conoce como el círculo Cenital.

**Ángulo de inclinación normal a la radiación solar para una superficie plana:** es importante que la inclinación del captador sea la adecuada. Para encontrar dicha inclinación se utilizó el modelo planteado por Duffie and Beckman [14] con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta_d \sin \phi \cos \beta - \sin \delta_d \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta_d \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta_d \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta_d \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (1)$$

Donde

- $\theta$  es el ángulo de incidencia
- $\delta_d$  es la inclinación del ángulo solar
- $\phi$  es la latitud del lugar.

- $\beta$  es la inclinación entre la superficie del captador y la horizontal
- $\gamma$  es el ángulo azimutal de la superficie
- $\omega$  es el ángulo horario

### 2.3. Principio de funcionamiento y clasificación

El objetivo de un captador solar para calentamiento de aire es obtener la energía útil proveniente de la radiación solar para calentar un flujo de aire que entrará en un espacio o edificio cerrado elevando la temperatura al interior del mismo, teniendo diferentes fines como la incubación, deshidratación de materia prima, acondicionamiento de temperatura, etc.

Al igual que los captadores solares de agua, los captadores solares para calentamiento de aire se pueden clasificar en dos categorías:

- a) Captadores solares de aire pasivos (figura 6 a): A grandes rasgos, un captador solar es pasivo cuando no requiere de maquinaria alguna para favorecer la circulación o extracción de aire. El principio de funcionamiento es conocido como convección natural o efecto termosifón, en el cual la placa absorbente del captador causa una diferencia de temperatura y por consecuencia un cambio en la densidad del fluido, haciendo que el flujo de aire con mayor temperatura se sitúe por encima del flujo de aire con menor temperatura.
- b) Captadores solares de aire activos (figura 6 b): Un captador solar activo, a diferencia del pasivo, la circulación del aire es de manera forzada por partes móviles las cuales controlan y distribuyen las ganancias térmicas solares. Se puede tratar de un ventilador, un extractor de aire o ambos.

A su vez, los captadores solares activos se pueden subclasificar en dos grupos de acuerdo con el patrón de circulación de aire [7].

- Sistemas de circuito cerrado: En estos circuitos no existe cambio de flujo, es decir, el aire está en un ciclo de recalentamiento constante.
- Sistemas de circuito abierto: En estos circuitos el aire a la entrada del captador de aire siempre proviene del exterior, teniendo cambios de flujo constantemente.

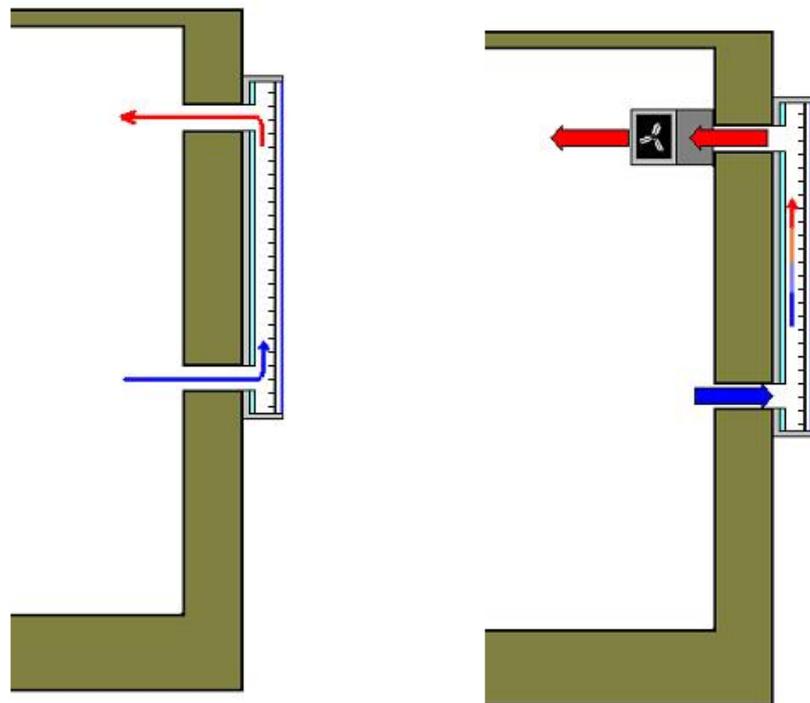
### 2.4. Comparación entre agua y aire como fluidos de trabajo

Como se mencionó recientemente, el principio de funcionamiento de los captadores solares para calentamiento de aire es el mismo que el de los captadores solares de agua. La principal diferencia entre estos dos tipos de captadores solares es el fluido de trabajo, el cual presenta ventajas y desventajas dependiendo de las temperaturas requeridas para su uso final.

Algunas de las diferencias más notorias entre el aire y el agua como fluido de trabajo son las propiedades termofísicas. Para el caso del agua, la capacidad calorífica es hasta cuatro veces mayor ( $4,186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ) en comparación con la del aire ( $1,012 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ). Asimismo, la densidad del agua es menor ( $1,000 \text{ kg/m}^3$ ) respecto a la del aire ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ )<sup>4</sup>, permitiendo transportar una mayor cantidad de energía en volúmenes menores.

Sin embargo, el aire también presenta algunas ventajas frente al agua: en condiciones de temperatura extremas el aire no presenta problemas de cambio de fase, como lo son la solidificación y el evaporación;

<sup>4</sup>Densidad en condiciones de presión atmosférica y a  $15^\circ\text{C}$ .



(a) Ejemplo de la circulación de aire por convección natural o efecto termosifón

(b) Ejemplo de la circulación forzada del aire, donde el ventilador o extractor hace más eficiente la circulación del aire.

Figura 6: Tipos de circulación de aire. Recuperado de [15].

los problemas de corrosión en los materiales del sistema por aire húmedo son menores a los del agua lo que nos permite emplear materiales menos rígidos y por ende más económicos; las pequeñas fugas pueden ser despreciables dado que es un circuito abierto a la atmósfera; la instalación de un captador solar para calentamiento de aire resulta más sencilla ya que no necesita elementos de prevención como anticongelantes o válvulas de alivio, etc.

## 2.5. Componentes del captador solar para calentamiento de aire.

A continuación se darán a conocer cada una de las partes que componen al captador solar para calentamiento de aire con el que se realizaron las pruebas de caracterización térmica, mismo del cual se muestra un diagrama en la figura 7 :

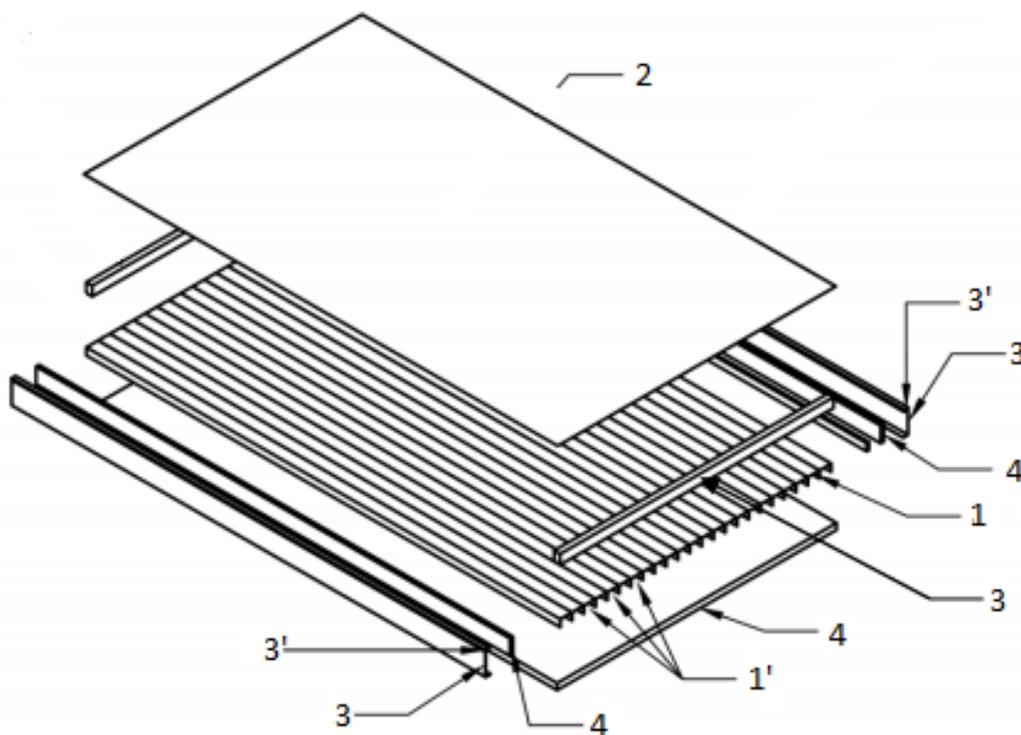


Figura 7: Diagrama del captador solar para calentamiento de aire. Recuperado de [16]

1. **Superficie absorbadora:** Es el componente principal del sistema, ya que es el encargado de captar la mayor parte de la radiación solar, para calentar el aire que circula, logrando que éste alcance temperaturas mayores a las del ambiente en el interior de dicho sistema.

Con el fin de mejorar la transferencia de calor se busca un aumento del área superficial en el cuerpo absorbador. Este está conformado por diferentes conductos (1' en la figura 7) a los que comúnmente se le realizan modificaciones las cuales consisten en darles distintas formas geométricas, ya sean cuadradas, rectangulares, triangulares, trapezoidales, onduladas, cilíndricas, entre otras. [6]

Los materiales de fabricación para los conductos pueden ser poliméricos como polipropileno, polietileno, cloruro de polivinilo (PVC) y acrílico; o bien, pueden ser metálicos como el cobre, aluminio, acero, acero inoxidable, lámina galvanizada, fierro y níquel. Además la superficie expuesta al sol debe incluir un recubrimiento que favorezca la absorción y disminuya la emitancia de la radiación (superficie selectiva), tales como pintura negra, óxido de cobre, óxido de titanio, etc. [16]

2. **Cubierta transparente:** Es una lámina de material transparente la cual tiene que tener la mayor ganancia de energía solar posible (2 en la figura 7). Para ello, dicho material debe presentar como características una alta transmitancia para las longitudes de onda corta provenientes de la irradiación solar y una baja emitancia para evitar la pérdida de calor radiativo proveniente de las longitudes de onda larga de la placa absorbadora.

El vidrio templado es el mejor material para la fabricación de la cubierta transparente por su bajo costo y alta durabilidad, aunque también se puede usar policarbonato y acrílico, los cuales si no se les agregan aditivos pueden verse afectados por la radiación ultravioleta (UV) con el paso del tiempo. [6]

3. **Armazón:** Este se encuentra en la superficie del cuerpo absorbedor y de la cubierta transparente teniendo la función hermética (3' en la figura 7) y de soporte, brindando protección contra la introducción de polvo y agua al sistema.

Para los materiales del armazón se pueden usar materiales metálicos, madera o plástico y en cuanto al sello encargado de fijar ambas partes se puede usar goma, plástico o silicón. [16]

4. **Aislamiento térmico:** Componente diseñado con el fin de reducir las pérdidas térmicas por la conducción de calor en la parte inferior y costados del cuerpo absorbedor (4 en la figura 7). Las características que tiene que tener un buen aislante térmico son la baja conductividad térmica y alta resistencia mecánica a impactos. [6]

En el caso de calentamiento de aire el nivel de temperaturas alcanzadas no es muy alto, por lo que no se necesitan aislamientos de alta resistencia o espesor. Los materiales que presentan un mejor desempeño como aislantes térmicos son el poliuretano expandido, polisocianurato, lana mineral, entre otros. [16]

5. **Ventiladores:** Los ventiladores controlan la dirección del flujo de aire y aumentan la transferencia de calor. Debe contar con la potencia suficiente para vencer la caída de presión y lograr una distribución más uniforme del fluido de trabajo por el captador de aire. [6]
6. **Difusores:** Este componente es una parte peculiar del sistema con el que se realizaron las pruebas. Dichos difusores se encuentran de manera externa a la salida del sistema. Los difusores, como se muestran en la figura 8, cuenta con diferentes deflectores colocados con diferentes ángulos, los cuales permiten recolectar el flujo de aire caliente y concentrarlo en la salida del colector solar para su posterior extracción. [16]

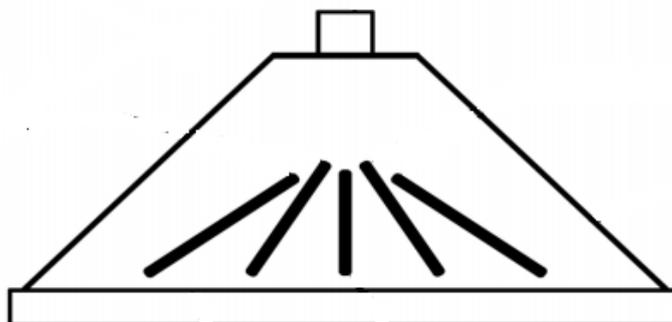


Figura 8: Esquema de un difusor para el captador de aire. Recuperado de [16]

Los difusores cuentan con una barrera localizada en el extremo de la interconexión la cual brinda rigidez en la unión y junto con un sello hermético de materiales poliméricos reducen las fugas de aire al exterior. El diseño de los difusores está pensado para la interconexión de sistemas en serie, paralelo o serie/paralelo para cubrir las diferentes necesidades de flujo y temperatura del usuario, por lo que es fácil la instalación y desinstalación de los difusores, los cuales, como se mencionó anteriormente deben estar a la salida del circuito.

## 2.6. Ecuación de la eficiencia térmica instantánea.

Para el consumidor es necesario conocer las condiciones de operación del producto que está adquiriendo, condiciones tales como la energía que absorben, la cantidad de calor que pierden, la respuesta a la modificación del ángulo de incidencia a la radiación solar, su capacidad calorífica, entre otros. A estos datos se les denominaron parámetros de caracterización, los cuales están normados por pruebas estandarizadas a nivel internacional.

Existen varios modelos numéricos de caracterización de captadores que comprenden diferentes parámetros, los cuales tienen diferente complejidad y propósitos. Existen modelos detallados que incluyen los parámetros de diseño del captador como lo son el espesor de placa, espacio entre tubos, número y material de cubiertas, materiales de aislante, dimensiones, etc. Asimismo existe un modelo más simple y adecuado para captadores de placa plana que incluye únicamente 2 parámetros: un parámetro que muestra cómo el captador absorbe la radiación y otro que muestra cómo pierde calor. Dichos parámetros pueden ser obtenidos con base en el rendimiento o eficiencia instantánea.

Cabe mencionar que el cálculo del rendimiento térmico de un captador de placa plana está dividido en tres partes. La primera son los efectos del ángulo de incidencia de la radiación solar, la segunda es el cálculo de la constante temporal del captador, una medida de la capacidad de calor efectivo y la tercera es el cálculo de la eficiencia instantánea.

La eficiencia instantánea de un captador solar, que funciona en condiciones de estado estacionario, se define como la relación de la potencia real útil extraída y la energía solar interceptada por el captador. La potencia útil real extraída, se calcula a partir de:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_{pe} \cdot c_{f,e} \cdot \vartheta_e) - (\dot{m}_{pi} \cdot c_{f,i} \cdot \vartheta_i) - ((\dot{m}_{pe} - \dot{m}_{pi}) \cdot c_{f,a} \cdot \vartheta_a) \quad (2)$$

Donde:

- $\dot{m}_{pe}$  es el flujo másico a la salida del captador.  $\frac{kg}{s}$
- $\dot{m}_{pi}$  es el flujo másico a la entrada del captador.  $\frac{kg}{s}$
- $c_{f,i}$  es el calor específico del fluido de trabajo a la entrada del captador.  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
- $c_{f,e}$  es el calor específico del fluido de trabajo a la salida del captador.  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
- $c_{f,a}$  es el calor específico del aire en el ambiente.  $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
- $\vartheta_e$  es la temperatura a la salida del captador.  $^\circ C$
- $\vartheta_i$  es la temperatura a la entrada del captador.  $^\circ C$
- $\vartheta_a$  es la temperatura del aire del ambiente o el aire a los alrededores del captador.  $^\circ C$

Considerando que la ley de conservación de masa se cumple en el sistema se puede suponer que el flujo másico a la entrada  $\dot{m}_{pi}$  es igual al flujo másico a la salida  $\dot{m}_{pe}$ . Asimismo se considera que el flujo de trabajo conserva su calor específico por lo que la ecuación (2) se reduce a

$$\dot{Q} = (\dot{m}_{pi} \cdot c_{f,i} \cdot \vartheta_e) - (\dot{m}_{pi} \cdot c_{f,i} \cdot \vartheta_i) \quad (3)$$

La ecuación (3) se puede reducir factorizando el flujo másico a la entrada  $\dot{m}_{pi}$  y el calor específico  $c_{f,i}$ , teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{pi} \cdot c_{f,i} (\vartheta_e - \vartheta_i) \quad (4)$$

La energía solar interceptada es el producto del área bruta del captador y la irradiancia solar. Siendo la eficiencia del captador:

$$\eta_{hem} = \frac{\dot{Q}}{AG} \quad (5)$$

donde:

- A es el área bruta del captador.  $m^2$
- G es la irradiancia solar.  $\frac{W}{m^2}$

Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 5, la eficiencia queda como:

$$\eta_{hem} = \frac{\dot{m}_{pi} \cdot c_{f,i} (\vartheta_e - \vartheta_i)}{AG} \quad (6)$$

Una vez que se han realizado las pruebas experimentales conforme las normas internacionales, los resultados muestran en una curva característica, como el ejemplo de la figura 9. Como se muestra en la gráfica, la eficiencia térmica instantánea del captador corresponde al eje vertical  $y$ , mientras que en el eje horizontal  $x$  se encuentran los parámetros climatológicos y de funcionamiento, como lo son la diferencia de temperatura promedio entre la entrada y la salida del captador ( $\vartheta_m$ ) menos la temperatura ambiente ( $\vartheta_a$ ), entre la irradiancia solar incidente en el plano del captador por unidad de superficie ( $AG$ ). A partir de los puntos de eficiencia térmica experimentales y de una regresión lineal (ecuación(7)) o cuadrática (ecuación(8)), se obtiene la curva característica del captador. [6]

$$\eta_{hem} = F_R(\alpha\tau) + c_1 \left[ \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} \right] \quad (7)$$

$$\eta_{hem} = F_R(\alpha\tau) + c_1 \left[ \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)}{G} \right] + c_2 \left[ \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G} \right] \quad (8)$$

En donde  $F_R$  es el factor de remoción de calor,  $\alpha$  y  $\tau$  corresponden a los índices ópticos de absorptancia y transmitancia, respectivamente. Para fines prácticos podemos denotar a  $c_0 = F_R(\alpha\tau)$ , teniendo así a  $c_0$ ,  $c_1$  y  $c_2$  como las constantes de la curva.

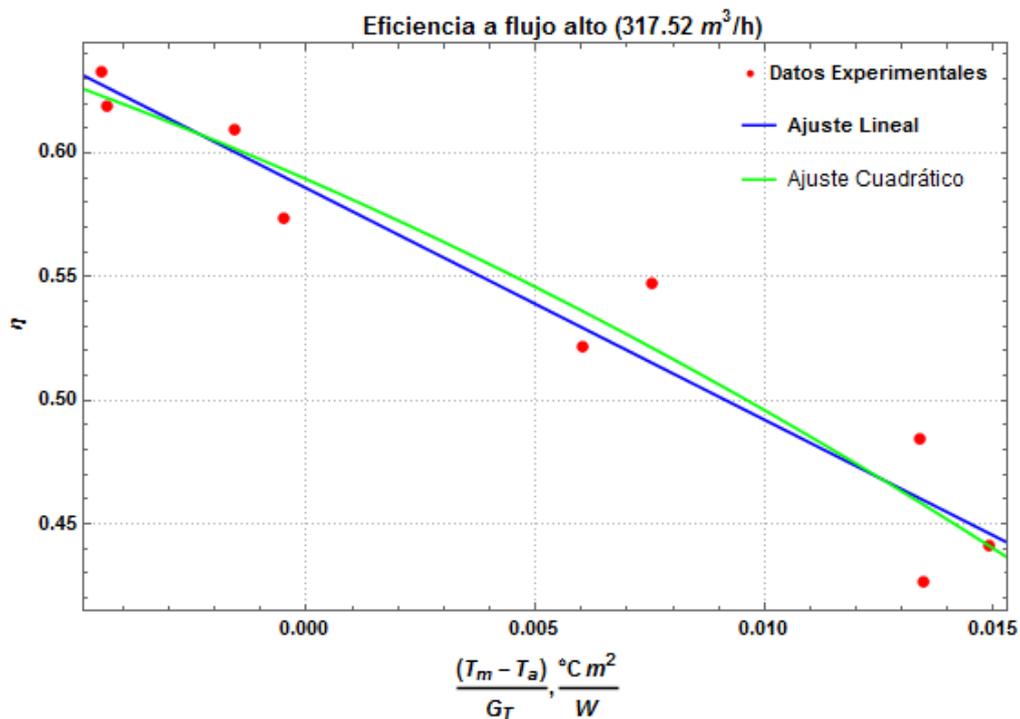


Figura 9: Ejemplo de una curva de eficiencia térmica instantánea

## 2.7. Factor modificador del ángulo de incidencia

Las pruebas experimentales para el cálculo del rendimiento térmico de un captador solar se realizan durante horas cercanas al mediodía solar, sin embargo es necesario conocer el rendimiento de dicho captador bajo horas en las que la radiación solar directa no tiene un ángulo perpendicular respecto a la superficie del captador.

El objeto de estas pruebas es determinar el rendimiento del captador solar a diferentes ángulos de incidencia de radiación solar, para lo cual se establecen las ecuaciones de modificador de ángulo de incidencia (Ecuación 9) y modificador de ángulo de incidencia para radiación directa (Ecuación 10):

$$k_{hem(\theta)} = \frac{\eta_\theta}{\eta_{hem}} \quad (9)$$

Donde

- $\eta_\theta$  es la eficiencia instantánea a diferentes ángulos de inclinación de la radiación solar incidente respecto a la superficie del captador -
- $\eta_{hem}$  es la eficiencia cuando la radiación solar incidente es perpendicular a la superficie del captador -

$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (10)$$

Donde

- $b_0 =$  coeficiente del modificador del ángulo de incidencia -
- $\theta =$  ángulo de incidencia sobre el captador °

El valor del coeficiente modificador del ángulo de incidencia  $b_0$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$b_0 = \frac{b}{a - b} \quad (11)$$

Donde  $a$  y  $b$  son el resultado del ajuste lineal por mínimos cuadrados de la curva obtenida al graficar  $1/\cos\theta$  en el eje de las  $x$  y en el eje  $y$  los puntos de eficiencia térmica instantánea obtenidos de los resultados de las pruebas experimentales correspondientes. Siendo la ecuación de la recta:

$$y = mx + c$$

$a$  tomaría el valor de la constante  $c$ , mientras que  $b$  tomaría el valor de la pendiente  $m$ .

## 2.8. Caída de presión

La caída de presión de un fluido se define como la diferencia de presiones entre dos puntos, la cual ocurre por las fuerzas de fricción generadas por la resistencia a fluir. Los resultados de las pruebas de caída de presión deben expresarse en Pascales (Pa) por lo que es necesaria una conversión de unidades, ya que las unidades que utilizan en general los instrumentos de medición utilizados están dados en pulgadas de agua ( $inH_2O$ ). Se considera que  $1 inH_2O = 249.09 Pa$ .

Cabe mencionar que el hecho de conocer la caída de presión a través del sistema (incluyendo los captadores y el difusor) es de vital importancia para la selección del ventilador que se requerirá en la instalación para obtener la cantidad de flujo deseado.

### 3. Metodología

El presente capítulo se divide en dos partes. En la primera parte se mostrarán los protocolos de experimentación de la norma ISO 9806:2013 “Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo” para un captador solar de aire de circuito abierto al ambiente, tal como el que se muestra en la figura 10.

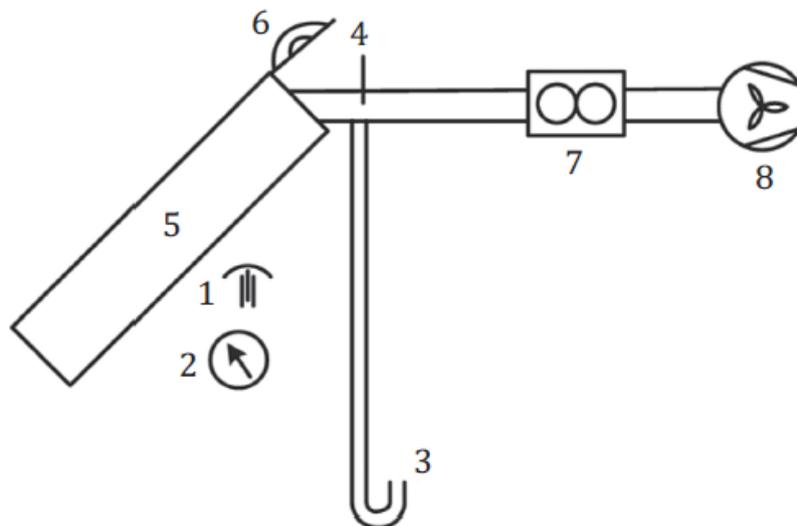


Figura 10: Ejemplo del esquema de un sistema de circuito abierto. Recuperado de [7]

Donde:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. Sensor de temperatura del aire a los alrededores | 5. Captador solar de aire |
| 2. Sensor de presión ambiental                      | 6. Piranómetro            |
| 3. Sensor de presión                                | 7. Flujómetro             |
| 4. Sensor de temperatura                            | 8. Ventilador             |

En la segunda parte del capítulo se muestran los elementos, equipos y materiales que se utilizaron para la instrumentación durante las pruebas experimentales, así como las características y marcas.

#### 3.1. Marco normativo

A continuación se muestran las consideraciones para las pruebas experimentales impuestas por el protocolo de la norma ISO 9806:2013 “métodos de prueba para captadores solares” para sistemas captadores solares de aire de circuito abierto en estado estacionario. Las pruebas de rendimiento incluyen la evaluación de la potencia térmica suministrada por el captador en diversas condiciones de operación, así como la evaluación de los parámetros adicionales del captador requeridos para el cálculo de la salida de calor del captador.

### 3.1.1. Ángulo de inclinación

Los captadores se pueden evaluar en distintos ángulos de inclinación, ya sea según lo recomendado por los fabricantes o ángulos especificados para instalaciones reales. De lo contrario, el captador se probará en ángulos de inclinación de modo que el modificador del ángulo de incidencia varíe en menos del 2% de su valor en la incidencia normal. Asimismo, el captador debe estar montado en posición hacia el Ecuador. La duración de la prueba está sujeta al rango de aceptación del ángulo de incidencia.

### 3.1.2. Irradiancia solar difusa y reflejada

El captador se ubicará donde no se refleje una radiación solar significativa en los edificios o superficies circundantes durante las pruebas, y donde no haya obstrucciones significativas en el campo de visión del mismo. No se debe obstruir más del 5% del campo de visión del captador, y es particularmente importante evitar los edificios u obstrucciones grandes que subtienden un ángulo de más de aproximadamente 15° con respecto a la horizontal frente a los captadores. La reflectancia de la mayoría de las superficies rugosas, como la hierba o el concreto desgastado, suele ser lo suficientemente baja como para que no se produzcan problemas durante la prueba del captador.

### 3.1.3. Protocolo de operación

El protocolo de operación para llevar a cabo la fase experimental de éste trabajo está determinado con base en la norma ISO 9806:2013 captadores solares térmicos: métodos de ensayo, la cual menciona lo siguiente:

Al usar el modelo de estado estable de la norma, los datos válidos registrados serán aquellos en los que la temperatura del sistema se encuentre lo más estable posible, por lo que se recomienda empezar la prueba media hora antes de que transcurra el mediodía solar, dando de ésta forma tiempo para que la temperatura se estabilice.

Al estar en la plataforma y antes de iniciar la prueba, se verificará que los equipos se encuentren en buen estado y funcionando. En cuanto al captador, no debe tener agua al interior y la cubierta transparente debe estar libre de polvo.

Tanto el ventilador, como los equipos que ayudan a elevar o disminuir las temperaturas a la entrada se conectan a la alimentación general de la cabina de monitoreo, en caso de ser utilizados.

Una vez que el equipo cumple con las condiciones anteriormente mencionadas se ajustan las condiciones de operación como la temperatura, velocidad de flujo másico y/o potencia, hasta llegar a un estado estable.

Al iniciar el sistema de adquisición de datos es necesario verificar que los sensores del sistema no se encuentren registrando valores incoherentes. Asimismo se requiere de una revisión periódica para comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

La duración de la prueba está sujeta a la duración de la posición solar, ya que la irradiancia que se tiene al mediodía solar disminuye con el paso del tiempo, causando, de igual manera, una disminución en las temperaturas de salida del sistema.

### 3.1.4. Condiciones de prueba

A continuación se darán a conocer los protocolos de la norma ISO 9806:2013 que se utilizaron para realizar las diferentes pruebas para llevar a cabo la caracterización de los captadores solares de

**Pruebas para la eficiencia térmica instantánea:** Durante la prueba el total de irradiancia solar sobre el plano del captador debe ser mayor de  $700 \text{ W/m}^2$ . Es importante tener en cuenta que el porcentaje de la irradiancia proveniente de la radiación difusa no debe ser mayor al 30 %<sup>5</sup>.

El valor promedio de la velocidad del aire paralelo al captador, teniendo en cuenta las variaciones espaciales sobre el captador y las variaciones temporales durante el período de prueba, será de  $3 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ .

Si el rango de temperaturas a la entrada del captador está especificada por el fabricante, los datos deben satisfacer los requerimientos dados y obtener al menos 4 diferentes temperaturas a la entrada espaciadas uniformemente en el rango de temperaturas especificado.

Si es posible, se seleccionará una temperatura de entrada tal que la temperatura media del fluido en el captador se encuentre dentro de un rango de  $\pm 3 \text{ K}$  de la temperatura del aire en el ambiente, para obtener una determinación precisa de la eficiencia térmica instantánea.

A menos que el fabricante especifique el rango de flujo del fluido, este debe establecerse en tres valores distribuidos equitativamente entre 30 y  $300 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  del área bruta. Si el fabricante tiene pautas para el flujo de aire, el caudal del fluido se debe establecer en los caudales máximo, mínimo y medio. El caudal de fluido se deberá mantener estable dentro de un rango de  $\pm 2 \%$  del valor establecido durante cada período de prueba y no deberá variar en más de  $\pm 5 \%$  del valor establecido de un período de prueba a otro.

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa en el captador debe estar en un rango en el que el ángulo incidente sobre el captador no varíe más de  $\pm 2^\circ$  de su valor en la incidencia normal.

El captador de calentamiento solar de aire debe medirse bajo presión ambiental para minimizar el caudal volumétrico de fuga.

**Pruebas para el modificador de ángulo de incidencia** Durante cada período de prueba, la orientación del captador debe ser tal que el captador se mantenga dentro de  $\pm 2.5^\circ$  del ángulo de incidencia para el cual se realiza la prueba. La irradiancia solar sobre el plano deberá ser mayor a  $300 \text{ W/m}^2$ . La prueba se debe realizar en alguno de los flujos utilizados para las pruebas de eficiencia térmica instantánea.

Existen dos métodos para determinar el modificador de ángulo de incidencia, el primero es para realizar pruebas en espacios interiores y el segundo es para pruebas en exteriores. En este caso se usará el segundo método de la norma.

La temperatura del fluido de trabajo se debe controlar de manera que no tenga una diferencia mayor a  $\pm 1 \text{ K}$  de la temperatura ambiental. En este caso el flujo de trabajo es el aire del ambiente, por lo que no necesita tratamiento previo.

Los valores de eficiencia deben ser determinados por pares de datos, es decir, un valor antes y un valor después del mediodía solar. El valor del ángulo de inclinación entre la superficie del captador y

<sup>5</sup>En la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005 el porcentaje máximo de radiación difusa es del 20 %.

el sol deben ser los mismos para ambos datos. La eficiencia del captador para el ángulo de incidencia específico se considerará igual a la media de los dos valores. Se recopilaron datos para inclinaciones de hasta  $60^\circ$ .

**Pruebas para caídas de presión** Las mediciones para las pruebas experimentales de caída de presión se realizaron desde la entrada del captador por la parte exterior del filtro, hasta la salida del difusor.

Los puntos de medición de presión a la salida del difusor deben tener cuatro tomas de presión al exterior del captador, como se muestra en la figura 11.

Las presiones en el circuito de prueba y la caída de presión del captador solar deben medirse utilizando orificios de presión estática y un manómetro o un transductor de presión diferencial. Los bordes de los orificios en la superficie interior del conducto deben estar libres de rebabas.

El diámetro del agujero no debe exceder el 40% del grosor de la pared o 1.6 mm. Además se deben de tomar mediciones de la presión absoluta del fluido de transferencia que ingresa.

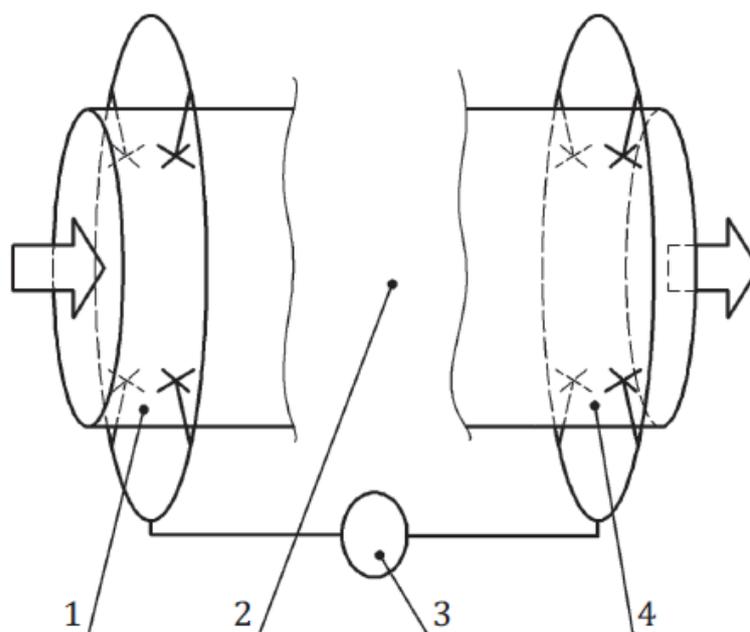


Figura 11: Representación esquemática de la medición de caída de presión. Recuperado de [7].

En donde:

1. conductos de entrada de aire de la prueba
2. captador solar
3. medidores de presión diferencial
4. conductos de salida de aire de la prueba

### 3.2. Instrumentación, dispositivos y elementos del sistema

En la siguiente tabla se enlistan los equipos que fueron utilizados durante las pruebas experimentales, además en las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran algunos de ellos:

Equipo	Marca y modelo	Especificaciones
Captador solar para calentamiento de aire	CASOLAIRE, diseñado y patentado por el IER-UNAM	Captador solar de placa plana. Es la parte principal para llevar a cabo el proceso de experimentación.
Ventilador	Air Technology modelo CFD-7	Ventilador con función de inyector y extractor. Cuenta con 0.5 hp de potencia y una velocidad nominal de 1740 rpm.
Calentador de aire	NAOKI modelo EH30435G	El calentador se utiliza para elevar la temperatura del aire a la entrada del captador. Cuenta con una potencia de 1500 W.
Acondicionador de aire portátil (enfriador)	Honeywell modelo MN12CES	El enfriador se utiliza para reducir la temperatura del aire a la entrada del captador hasta los 16°
Computadora portátil	Lenovo	La computadora debe contar con un puerto usb para conectarse al adquirente de datos. Se cuenta con un programa desarrollado en VEE pro cuya interfaz permite analizar los datos de la prueba experimental en tiempo real.
Medidor de flujo	Sierra Quadra Therm modelo 780i-VT-1-F8-E2-P2-V4-DD-0-8- 11-12	Dispositivo capaz de medir la temperatura y el flujo volumétrico en °C y $Nm^3/h$ (metros cúbicos normalizados por hora) respectivamente. El equipo cuenta con una precisión de $\pm 0.5\%$ en la lectura de datos.
Adquisidor de datos	Agilent 34970A	Adquisidor con 20 canales para las señales de los diferentes sensores y equipos de medición.
Piranómetro	KIPP & ZONEN modelo CMP6, categoría ISO 9060: primera clase.	Este dispositivo cuenta con un rango de operación de $-20^\circ$ a $80^\circ$ y tiene un margen de error direccional $< 20W/m^2$

Equipo	Marca y modelo	Especificaciones
Sensores PT1000	Sin marca	El sistema cuenta con nueve sensores repartidos a la entrada y salida del captador. Cada sensor mide con un error de $\pm 0.2^{\circ}C$ .
Medidor de presión diferencial	Testo modelo 512	El rango de operación va de 0 a 2hPa, con un rango de error de 0.01 hPa.
Sensores de humedad y temperatura	AOSONG modelo AM2302	El sistema cuenta con dos de estos sensores ubicados a la entrada y a la salida del captador. El rango de operación de cada sensor va de $-20$ a $80^{\circ}C$ . Las sensibilidades para medir temperatura son de $\pm 0.5^{\circ}C$ y de $\pm 2\%$ para las mediciones de humedad.
Variador de frecuencia	YASKAWA - V1000	Este elemento modifica la frecuencia eléctrica del ventilador permitiendo así manejar la velocidad de succión del mismo.
Anemómetro	YOUNG - 03002	Dispositivo capaz de medir la velocidad del viento con un error de $\pm 0.5m/s$ y temperatura con un error de $\pm 0.5^{\circ}C$ <sup>6</sup> .

Tabla 1: Instrumentos de medición y dispositivos utilizados para realizar las pruebas experimentales.

Además se cuenta con elementos complementarios como bases metálicas que permiten modificar el ángulo de inclinación de los captadores, cables de señal para el adquisidor, una cabina de monitoreo y tuberías flexibles de aluminio de cuatro pulgadas para unir la salida del difusor con el medidor de flujo y el medidor de flujo con el ventilador.



Figura 12: Fotografía del banco de pruebas experimentales.



Figura 13: Fotografía del variador de frecuencia y el flujómetro



Figura 14: Fotografía del medidor de presión diferencial



Figura 15: Fotografía del piranómetro Kipp & Zonen CMP6.

## 4. Resultados

Los resultados de las pruebas experimentales realizadas bajo los protocolos de la norma ISO 9806:2013 se muestran a continuación. En la primera sección se muestran las curvas de eficiencia térmica instantánea, en la segunda sección se muestran los resultados de las pruebas de caídas de presión y en la tercera sección se muestran los resultados de las pruebas de ángulo incidente.

### 4.1. Curvas de eficiencia térmica instantánea

Las pruebas de eficiencia térmica instantánea se desarrollaron bajo diferentes condiciones, en las cuales difieren tanto el número de captadores en serie (uno, dos y tres), como el flujo volumétrico normalizado ( $Nm^3/h$ ) ó flujo másico (kg/s) a través del sistema (flujo bajo, medio y alto, tabla 2) dando como resultado nueve pruebas diferentes. Además, las pruebas experimentales se complementaron cambiando las condiciones de temperatura a la entrada, haciendo uso tanto de un calentador, como de un enfriador de aire, generando así una mayor diferencia de temperaturas respecto a la temperatura ambiental, lo cual nos permite tener una mayor distribución de puntos de la curva de eficiencia térmica instantánea.

Flujo	Flujo volumétrico [ $m^3/h$ ]	Flujo másico [ $kg/s$ ]
Bajo	188.26	0.048
Medio	252.89	0.065
Alto	317.52	0.082

Tabla 2: Diferentes flujos para las pruebas experimentales de eficiencia térmica instantánea

#### 4.1.1. Curvas de eficiencia térmica instantánea para un captador

En las figuras 16, 17 y 18 se muestran los ajustes lineal y cuadrático de las pruebas experimentales para un captador a flujo bajo, medio y alto, respectivamente. Asimismo, podemos observar en la tabla 3 los coeficientes y rangos de eficiencia para las mismas pruebas experimentales.

En primera instancia podemos observar que, independientemente del flujo de trabajo, la eficiencia es mayor para temperaturas de entrada menores respecto a temperaturas ambientales, lo que era de esperarse dado que se tienen menores pérdidas al ambiente. También se puede apreciar que tanto el incremento de flujo en las tres pruebas como el decremento en la diferencia de temperaturas respecto al ambiente propicia un incremento en la eficiencia.

Para las curvas de eficiencia de un captador a flujo bajo (figura 16) se puede observar que no existen grandes diferencias entre el ajuste lineal y cuadrático. Asimismo se puede observar que el rango de eficiencias bajo estas condiciones de operación se encuentra entre 30 % y 56 %.

En la figura 17 se muestran los resultados de la siguiente prueba que se realizó con un captador a flujo medio. Al igual que en la prueba anterior, los resultados experimentales muestran estabilidad por lo que no se aprecia una clara diferencia entre los ajustes lineales y cuadráticos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se puede observar un ligero incremento de la eficiencia térmica instantánea con el incremento de flujo, la cual se encuentra en un rango de entre 38 % y 59 %.

Los resultados de la prueba a flujo alto con un captador se muestran en la figura 18. Al tratarse de un flujo mayor se puede observar que hay mayor inestabilidad en los resultados experimentales, por lo

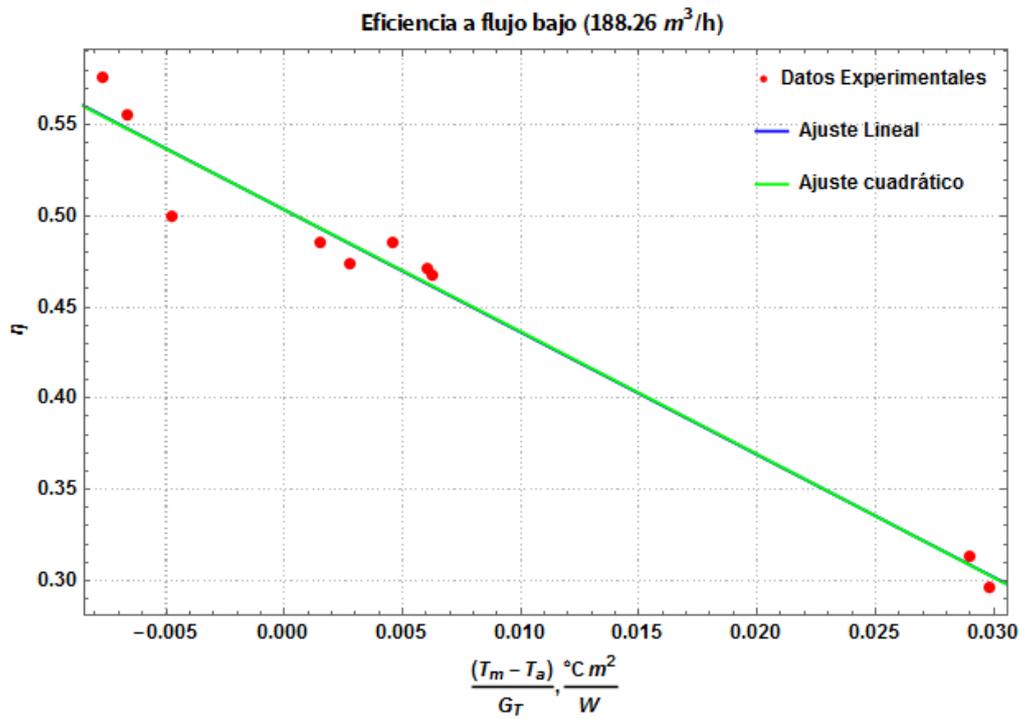


Figura 16: Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo bajo.

tanto un modelo cuadrático se ajusta mejor a los puntos de eficiencia, aunque en el rango de eficiencias no hay gran diferencia. Dicho rango de eficiencias se encuentra entre 44% y el 64%.

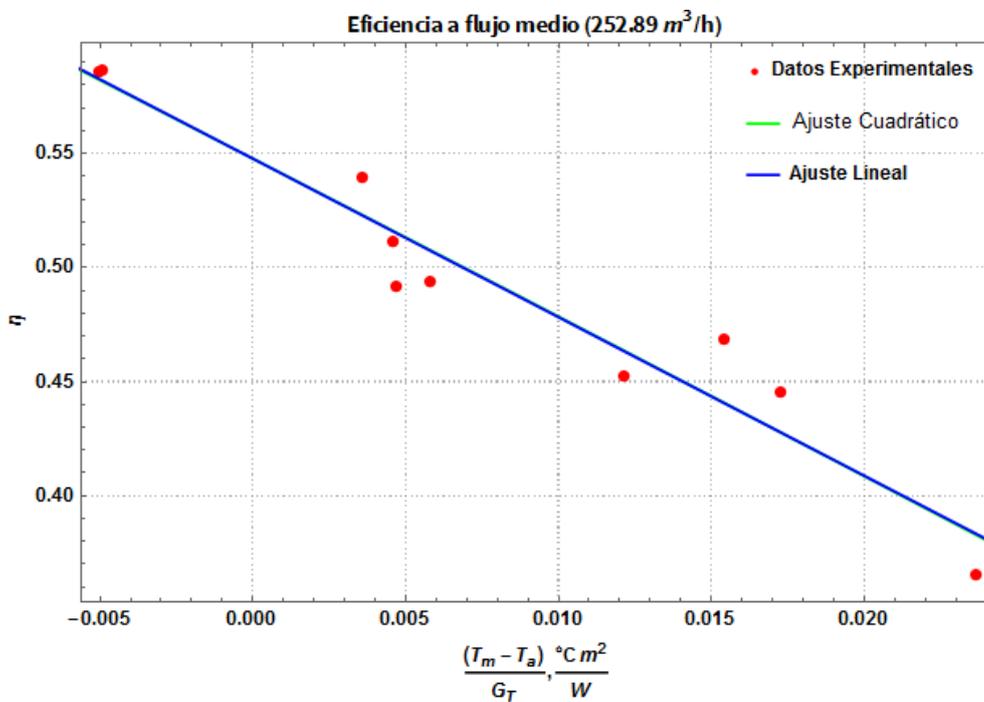


Figura 17: Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo medio.

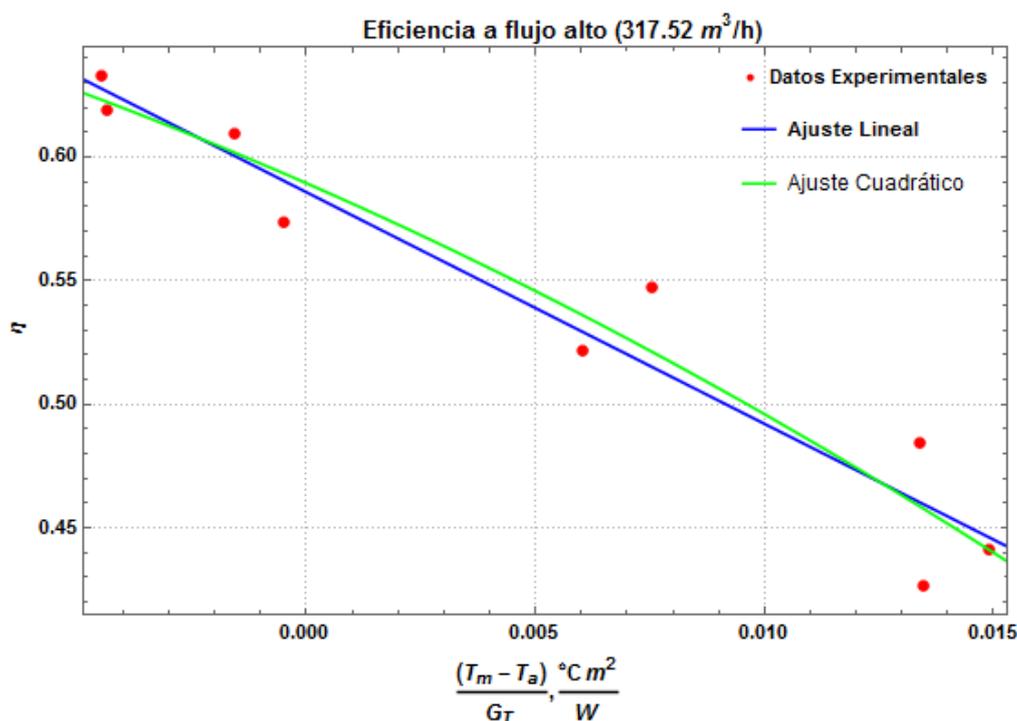


Figura 18: Curva de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a flujo alto.

Flujo	Ajuste	Rango de eficiencias [%]	Coefficiente $c_0$	Coefficiente $c_1$	Coefficiente $c_2$
Bajo	Lineal	30-56	0.503	-6.717	-
Bajo	Cuadrático	30-56	0.503	-6.677	-1.644
Medio	Lineal	38-58	0.547	-6.953	-
Medio	Cuadrático	38-58	0.547	-6.892	-3.576
Alto	Lineal	44-63	0.585	-9.363	-
Alto	Cuadrático	44-62	0.589	-8.097	-124.094

Tabla 3: Eficiencias térmicas instantáneas y coeficientes para un captador a diferentes flujos

Como se puede apreciar en la tabla 3 el rango de eficiencias entre las pruebas a flujo bajo y flujo alto tienen una diferencia de 14 % para las eficiencias menores y de 6 % para las eficiencias mayores, lo que significa que aunque existen mayores pérdidas hacia el ambiente al aumentar el flujo, las eficiencias menores para flujo alto son considerablemente mayores en comparación a las eficiencias menores para flujo bajo debido a que el incremento en la velocidad del flujo aumenta la turbulencia, favoreciendo la transferencia de calor por convección.

Finalmente la comparación de los ajustes lineal y cuadrático para las eficiencias de un captador a diferentes flujos se muestra en las figuras 19 y 20, respectivamente. En dichas figuras se puede observar que en las eficiencias para flujo bajo y flujo medio se presentan menores pérdidas de eficiencia en función de las temperaturas promedio en comparación a la curva de eficiencia térmica instantánea a flujo alto. Por otro lado, a pesar de que la eficiencia pico es mayor en las curvas para flujo alto, se puede observar que entre mayor sea la temperatura del aire promedio en el captador respecto a la temperatura ambiental para una irradiancia constante, las pérdidas al ambiente son mayores (se tiene un coeficiente de pérdidas mayor para estos casos), lo cual da como resultado un decremento más

pronunciado en la eficiencia.

Cabe destacar que, para el caso de un captador en serie a diferentes flujos, no hay diferencias apreciables entre el ajuste lineal y cuadrático.

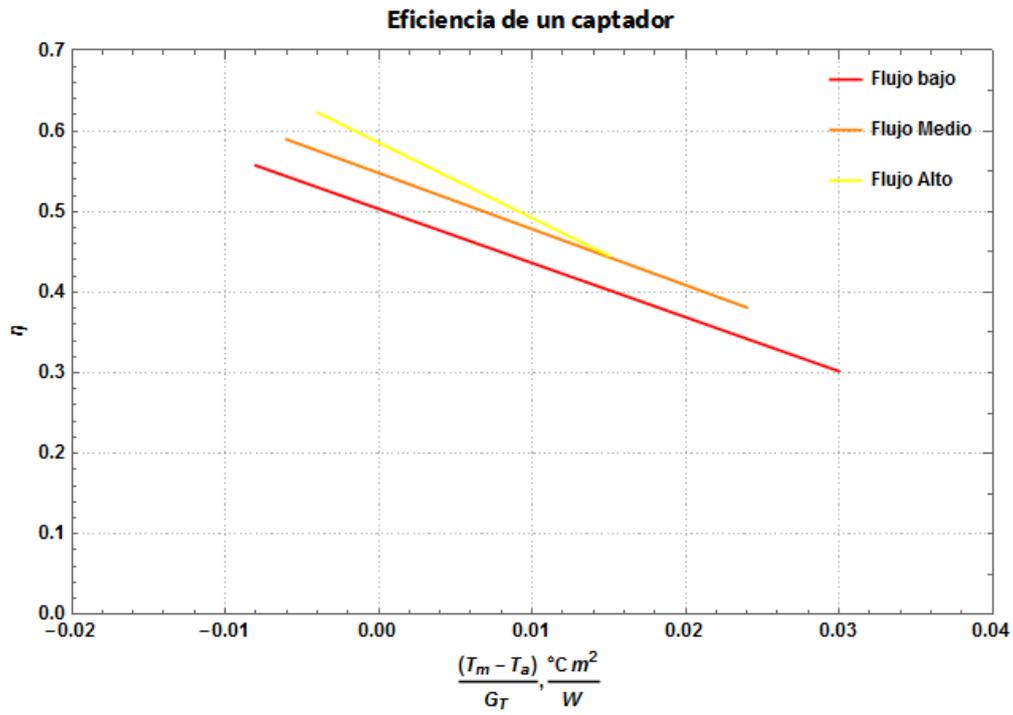


Figura 19: Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a diferentes flujos

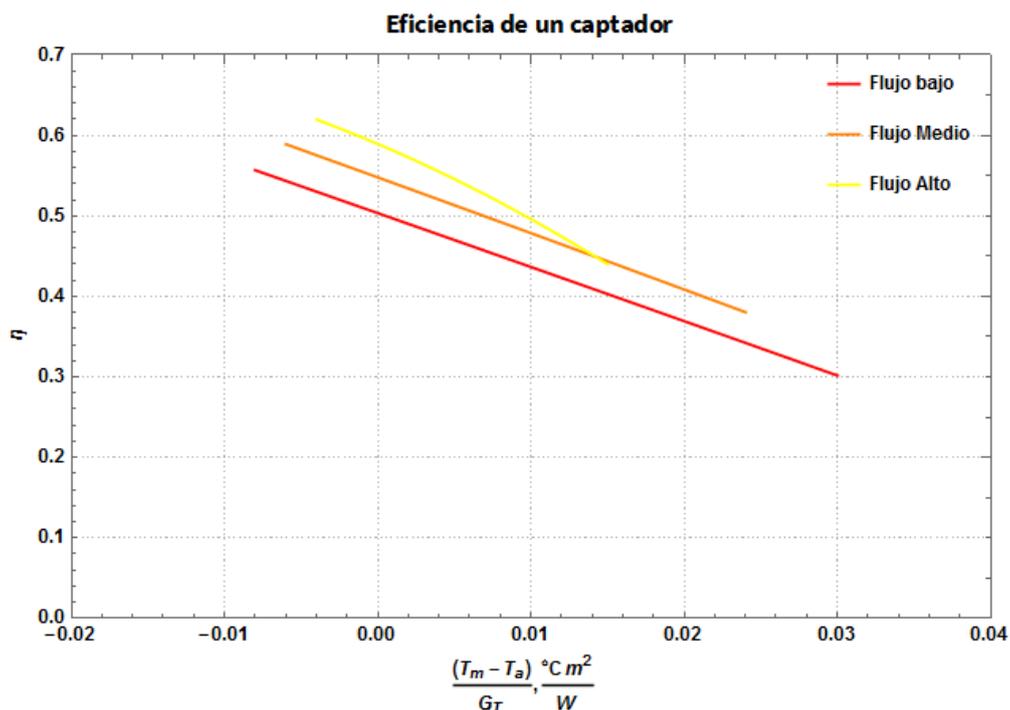


Figura 20: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de un captador operando a diferentes flujos

#### 4.1.2. Curvas de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie

Los resultados de las pruebas realizadas con dos captadores conectados en serie se muestran a continuación. En las figuras 21, 22 y 23 se muestran los ajustes lineal y cuadrático para las curvas de eficiencia térmica instantánea a flujo bajo, medio y alto, respectivamente. En la tabla 4 se muestran tanto los rangos de eficiencia como los coeficientes resultantes de las curvas de eficiencia.

En la figura 21 se muestran los resultados para la prueba a flujo bajo donde podemos observar una pequeña diferencia entre los ajustes cuadrático y lineal, teniendo un rango de eficiencias de 28 a 48 % para el ajuste lineal y un rango de 27 a 45.5 % para el ajuste cuadrático, el cual se ajusta de mejor manera a los puntos de eficiencia de las pruebas realizadas.

Posteriormente, en la figura 22, tenemos los ajustes para las pruebas a flujo medio. Como es de esperar, la eficiencia ha incrementado con el aumento del flujo. Además se puede observar una mayor distribución de los puntos de eficiencia, así como un mejor ajuste cuadrático, mostrando un rango de eficiencias que van de 37 a 53 %, mientras que el ajuste lineal va de 36 a 53 %.

En la figura 23 podemos observar una gran similitud entre los ajustes lineal y cuadrático, ambos mostrando un rango de eficiencias que está entre el 43.5 y el 60 %.

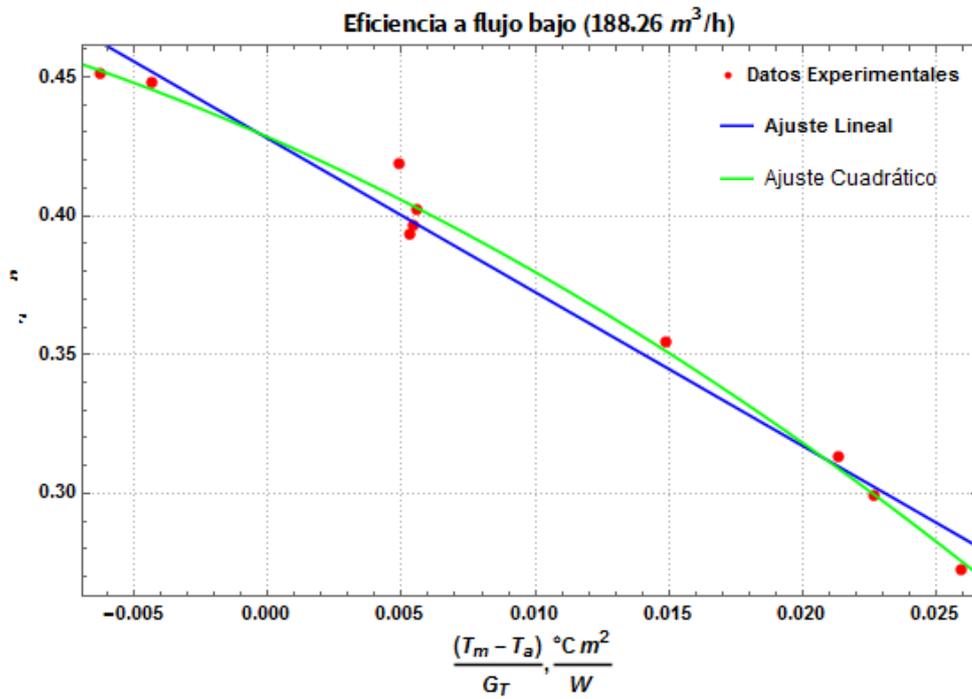


Figura 21: Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo bajo.

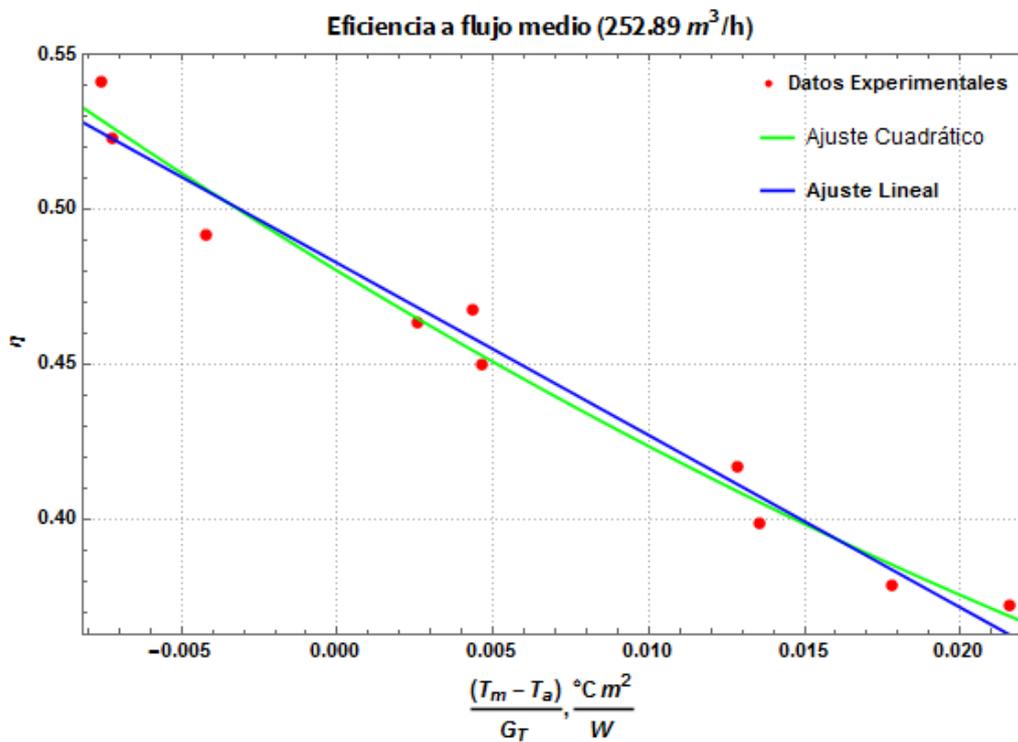


Figura 22: Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo medio.

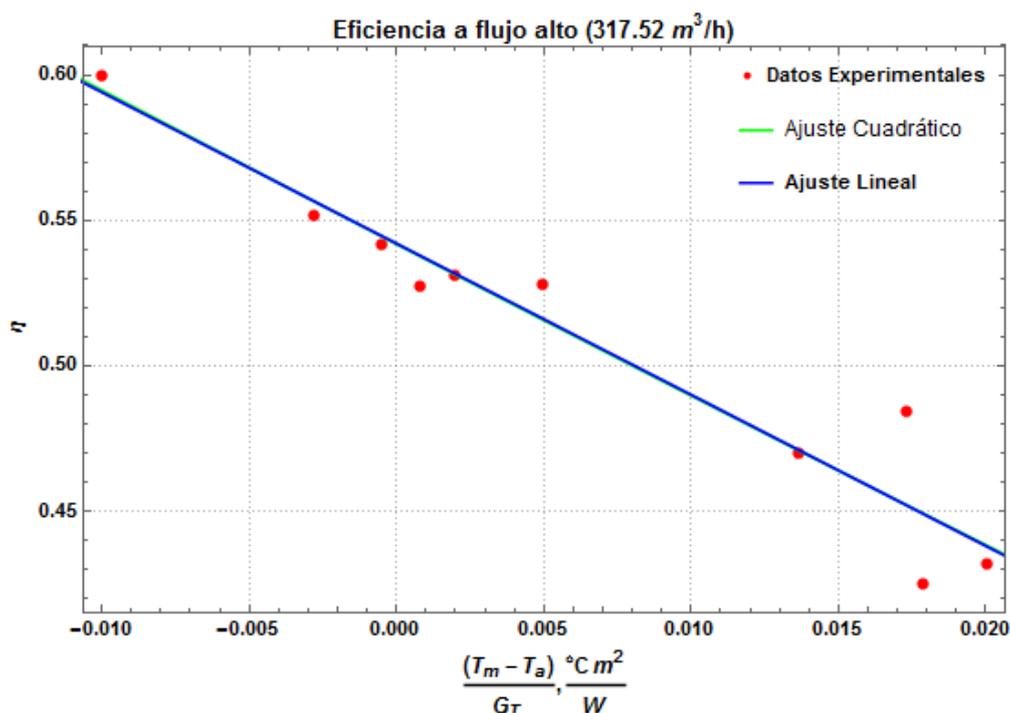


Figura 23: Curva de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a flujo alto.

Analizando la tabla 4 podemos observar un comportamiento similar en los rangos de eficiencia de la tabla 3, los cuales entre flujo bajo y alto tienen un incremento de 15 % para las eficiencias instantáneas menores; y un incremento de 12 % para las eficiencias instantáneas mayores.

En comparación con la tabla 3 podemos observar un ligero decremento en las eficiencias en los diferentes flujos. Esto se debe a que las pruebas experimentales para diferentes captadores conectados en serie se realizaron con los mismos flujos, teniendo un aumento de la temperatura a la salida, propiciando un decremento de la eficiencia térmica instantánea debido a unas mayores pérdidas al ambiente.

Por último se muestra la comparación a flujo bajo, medio y alto de las pruebas con dos captadores conectados en serie. En la figura 24 se muestra el ajuste lineal, mientras que en la figura 25 se muestra el ajuste cuadrático. En ambas figuras podemos observar que la eficiencia es mayor con el incremento del flujo másico. Además podemos constatar en la tabla 4, que los coeficientes  $c_1$  (correspondiente a las pendientes de las curvas) tienen un valor similar, mientras que el coeficiente  $c_0$ , es decir la ordenada al origen, existe variación.

Cabe destacar que a diferencia de las pruebas con un captador, en las pruebas con dos captadores en serie el flujo alto tiene una mayor estabilidad por lo que la eficiencia toma un comportamiento lineal respecto al incremento de temperatura a la entrada. Asimismo, los errores experimentales son menores al tener un mayor incremento de temperatura entre la entrada y la salida.

Flujo	Ajuste	Rango de eficiencias [%]	Coefficiente $c_0$	Coefficiente $c_1$	Coefficiente $c_2$
Bajo	Lineal	28-48	0.427	-5.529	-
Bajo	Cuadrático	27-45	0.428	-4.216	-64.199
Medio	Lineal	36-53	0.482	-5.556	-
Medio	Cuadrático	37-53	0.480	-6.091	43.019
Alto	Lineal	43-60	0.542	-5.198	-
Alto	Cuadrático	43-60	0.541	-5.250	4.082

Tabla 4: Eficiencia térmica instantánea y coeficientes para dos captadores conectados en serie a diferentes flujos

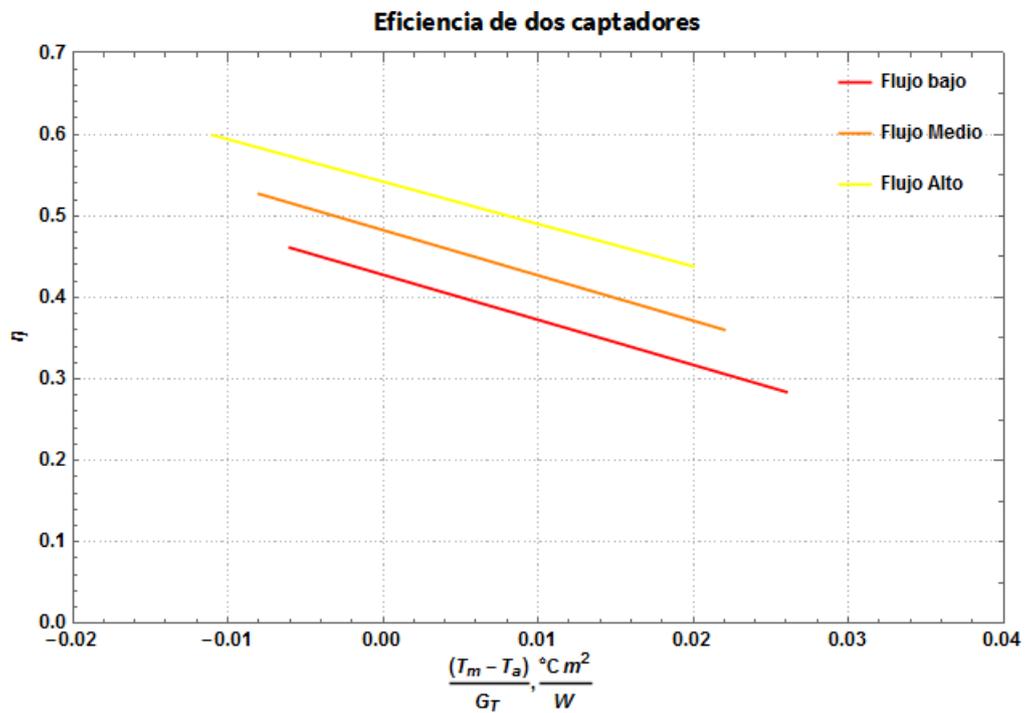


Figura 24: Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea para dos captadores conectados en serie a diferentes flujos

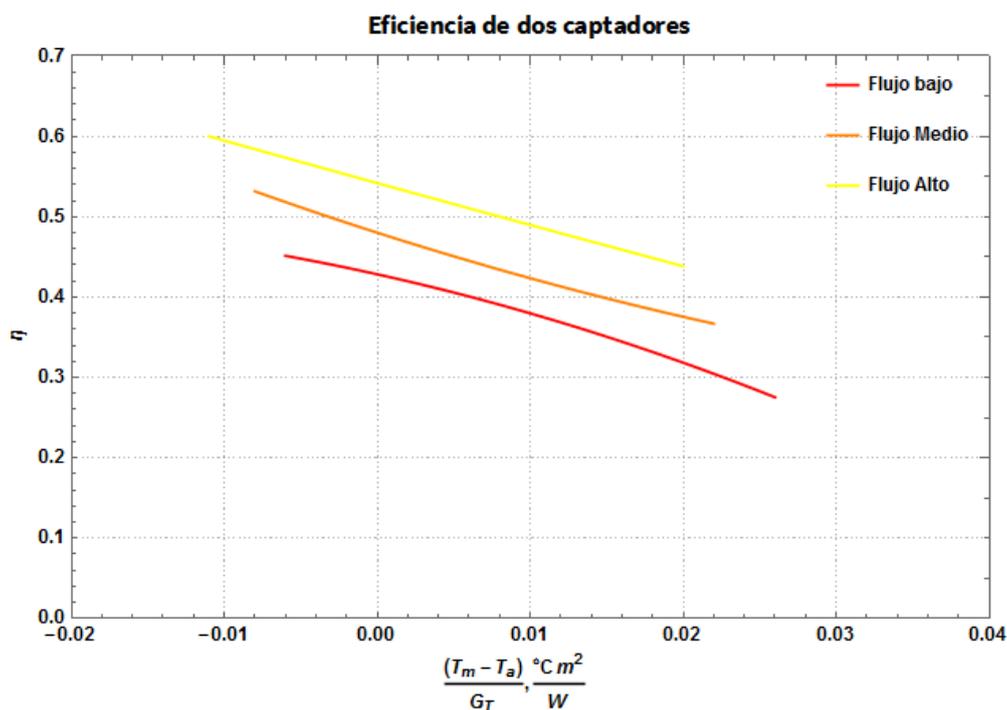


Figura 25: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de dos captadores conectados en serie operando a diferentes flujos

#### 4.1.3. Curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie

Al igual que para uno y dos captadores, los resultados de las pruebas para tres captadores en serie se muestran en las figuras 26, 27 y 28 para flujo bajo, medio y alto, respectivamente; asimismo se muestran los coeficientes y rangos de eficiencia en la tabla 5.

En la figura 26 se muestran los ajustes cuadrático y lineal de los puntos de eficiencia los cuales no muestran gran dispersión por lo que no hay mayor diferencia entre ambos ajustes. El rango de eficiencias se encuentra entre 28 y 43 %.

En la figura 27, al igual que a flujo bajo, las pruebas experimentales mostraron estabilidad en los resultados haciendo que los ajustes lineal y cuadrático no muestren mayor diferencia. Los rangos de eficiencia se encuentran entre 29 y 46 %.

A diferencia de las dos pruebas anteriores, los resultados a flujo alto muestran diferencia entre los ajustes lineal y cuadrático. Los rangos de eficiencia para el ajuste lineal se encuentran entre 31 y 56 %, mientras que el ajuste cuadrático se encuentre entre 30 y 54 %.

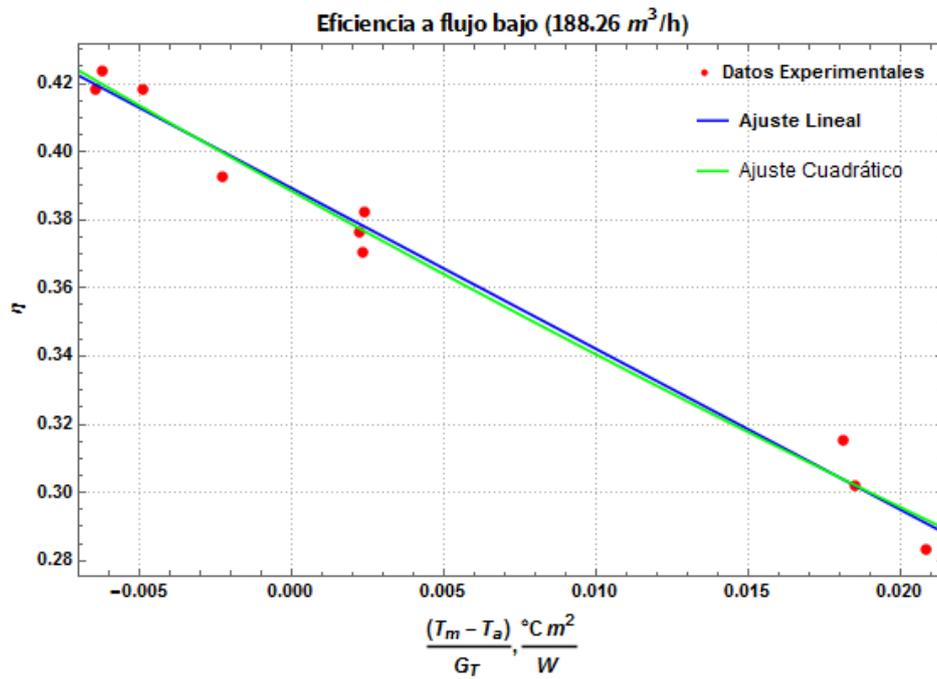


Figura 26: Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo bajo.

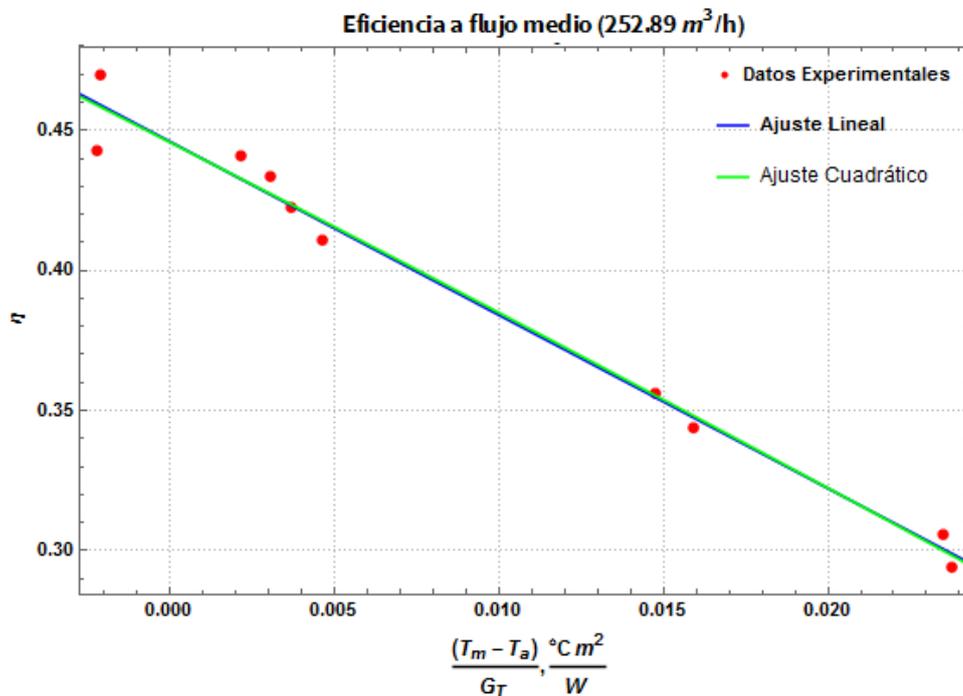


Figura 27: Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo medio.

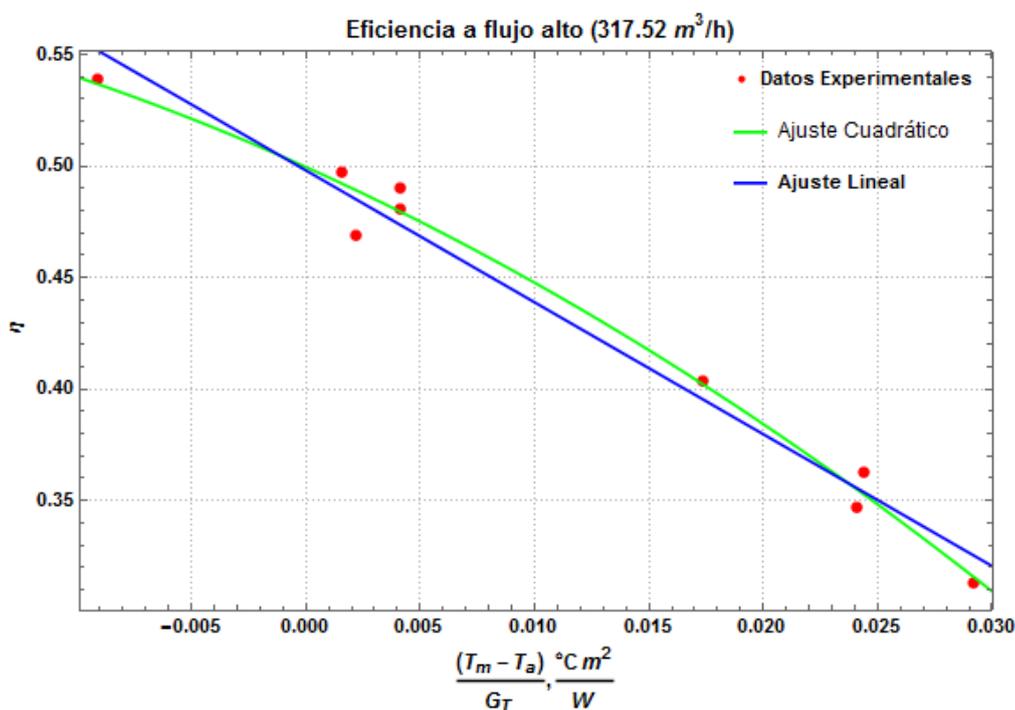


Figura 28: Curva de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a flujo alto.

Flujo	Ajuste	Rango de eficiencias [%]	Coefficiente $c_0$	Coefficiente $c_1$	Coefficiente $c_2$
Bajo	Lineal	28-42	0.389	-4.720	-
Bajo	Cuadrático	28-42	0.388	-4.950	15.568
Medio	Lineal	29-46	0.445	-6.184	-
Medio	Cuadrático	29-46	0.445	-5.996	-8.577
Alto	Lineal	31-56	0.498	-5.913	-
Alto	Cuadrático	30-54	0.499	-4.610	-57.711

Tabla 5: Eficiencia térmica instantánea y coeficientes para tres captadores en serie a diferentes flujos

Como podemos observar en la tabla 5 hay un decremento en la eficiencia respecto a las pruebas anteriores (uno y dos captadores en serie), como se mencionó anteriormente, el área de los captadores cambia entre las pruebas mientras el flujo se mantiene constante, teniendo como resultado el ya mencionado decremento de eficiencia y aumento de temperatura a la salida.

También podemos observar que las eficiencias menores entre flujo bajo y flujo alto solo tienen una diferencia del 2%. En comparación con las pruebas anteriores, el cambio de las eficiencias menores es menor, mientras que en las eficiencias mayores mantiene una diferencia del 12%.

Por último, en las figuras 29(ajuste lineal) y 30(ajuste cuadrático) se muestra la comparación de las curvas de eficiencia térmica instantánea a diferentes flujos. En dichas figuras podemos observar que a mayor flujo, mayores son las pendientes de las curvas. Como mencionamos anteriormente, las pérdidas al ambiente son mayores con el incremento de temperatura del captador con respecto a la del ambiente para una irradiancia constante.

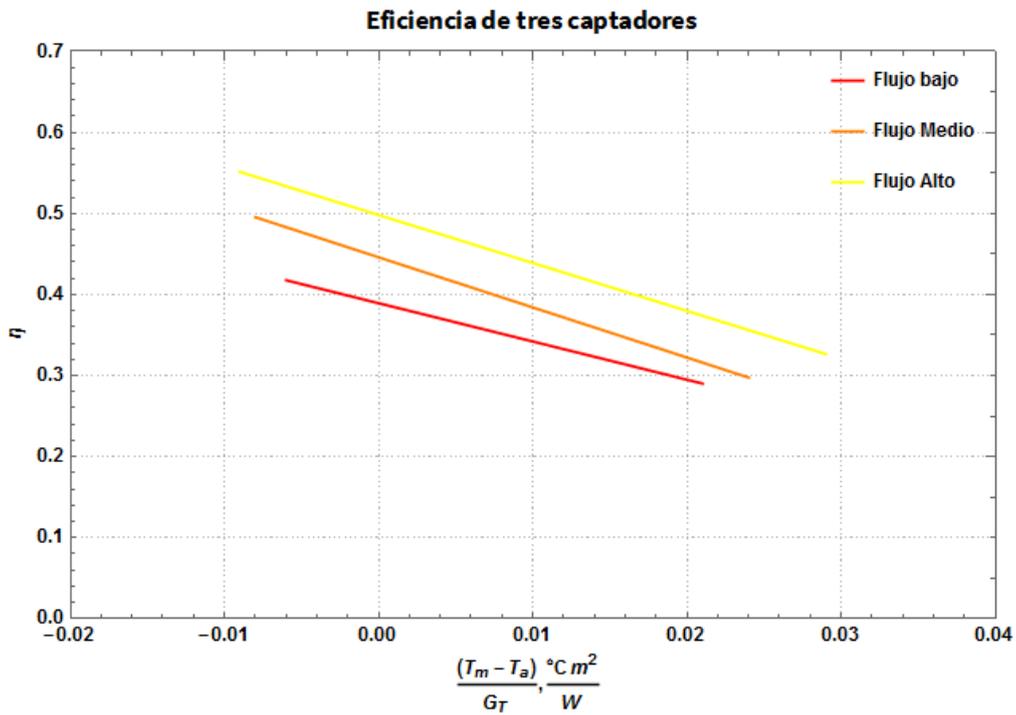


Figura 29: Ajuste lineal de las curvas de eficiencia térmica instantánea para tres captadores conectados en serie a diferentes flujos

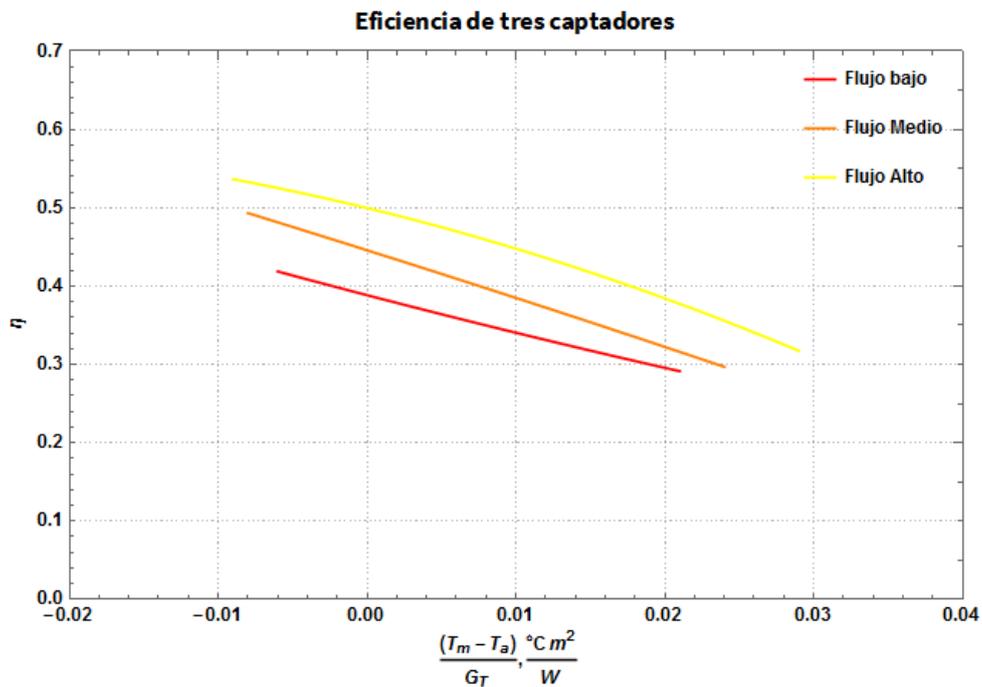


Figura 30: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos

#### 4.1.4. Comparación de eficiencias térmicas instantáneas para los diferentes arreglos

En las figuras 31, 32 y 33 se comparan las eficiencias térmicas instantáneas de los 3 captadores con el mismo flujo con el fin de analizar el comportamiento de las curvas de eficiencia en función del número de captadores en serie.

En la figura 31 se muestran los ajustes cuadráticos de las curvas de eficiencia térmica instantánea de uno a tres captadores conectados en serie a flujo bajo. Con esto se demuestra que la eficiencia decrementa entre mayor sea el número de captadores conectados en serie. Asimismo la curva de eficiencia de un captador tiene una pendiente mayor, dado que las pérdidas al ambiente son mayores.

En la figura 32 se muestran las curvas de eficiencia térmica instantánea de uno, dos y tres captadores conectados en serie trabajando a flujo medio. De igual manera podemos observar que la eficiencia es mayor para el arreglo de un captador aunque al igual que a flujo bajo, la curva de un captador presenta la mayor de las pendientes, mientras que la menor de las pendientes y eficiencias pertenece a la curva de eficiencia del arreglo de tres captadores en serie.

Finalmente, en la figura 33 se muestran los ajustes cuadráticos de los puntos de eficiencias térmicas instantáneas de uno, dos y tres captadores trabajando a flujo alto. Podemos observar que las eficiencias aumentan gracias a que el incremento de flujo propicia que el coeficiente convectivo del flujo favorezca la transferencia de calor. Cabe destacar que la mayor de las eficiencias térmicas instantáneas está dada por el arreglo con un captador, sin embargo el incremento de temperatura a la entrada hace que las pérdidas de calor aumenten y la pendiente de la curva de eficiencia se vea afectada al punto en que la menor de las eficiencias mostradas está dada por el mismo arreglo. En cuanto a las curvas de dos y tres captadores se puede observar un comportamiento mayormente lineal, teniendo en la curva de tres captadores una mayor pendiente.

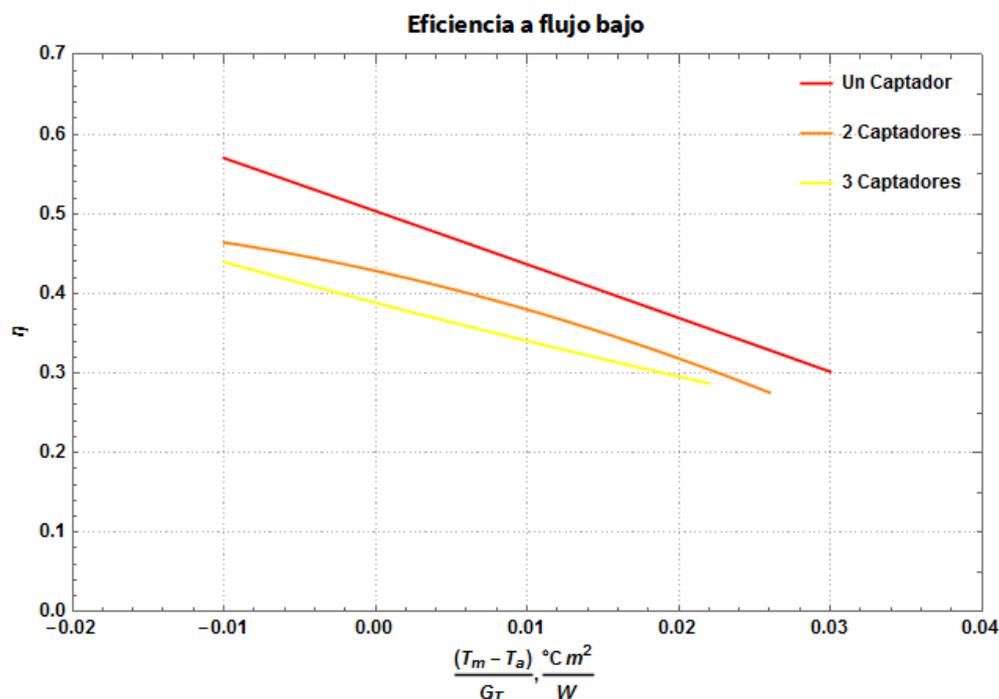


Figura 31: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos

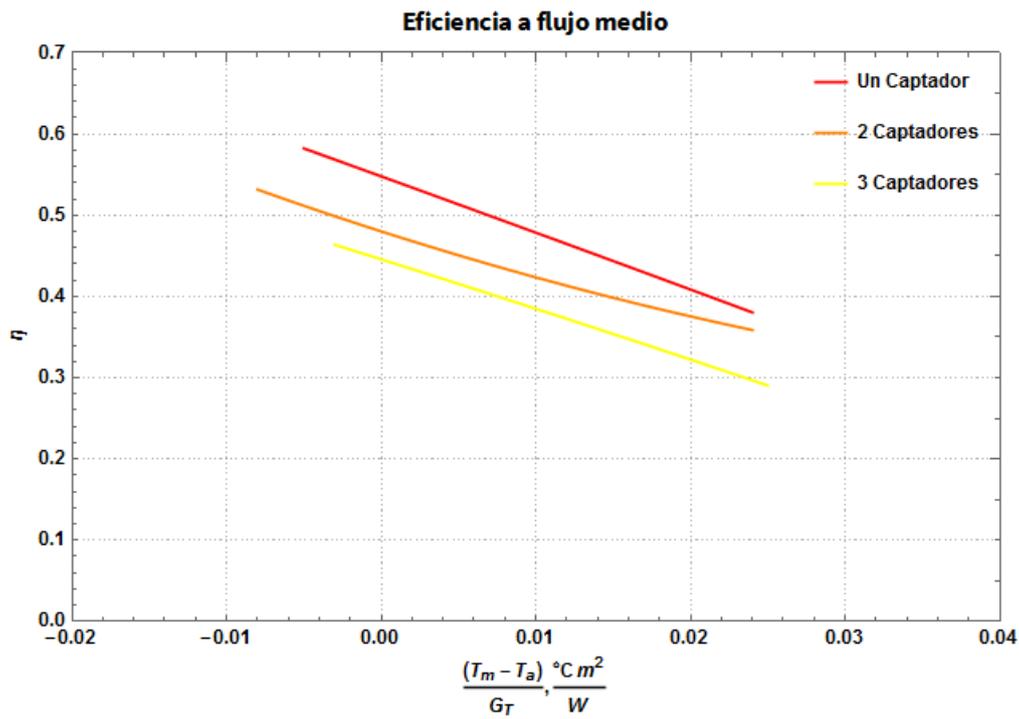


Figura 32: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos

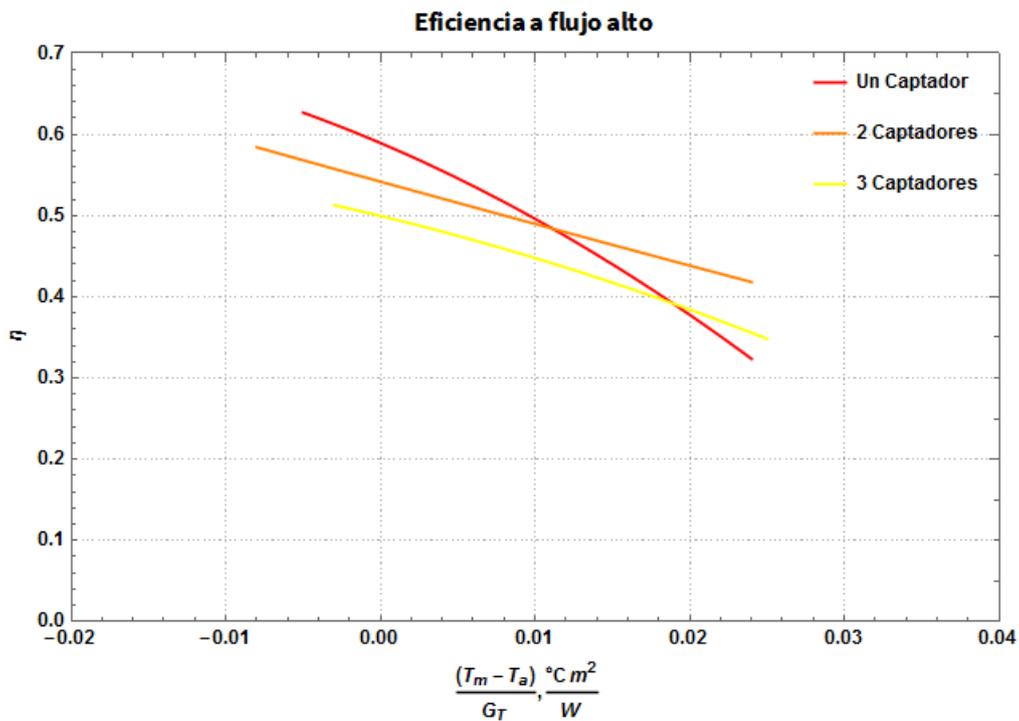


Figura 33: Ajuste cuadrático de las curvas de eficiencia térmica instantánea de tres captadores conectados en serie operando a diferentes flujos

#### 4.1.5. Rangos de temperatura

Al igual que la eficiencia térmica instantánea, un parámetro que es de utilidad para el usuario final es el rango de temperaturas de operación del captador solar, tanto a la entrada, como a la salida. Dichos rangos se reportan en la tabla 6

Arreglo	Flujo [ $m^3/h$ ]	Rango de temperaturas a la entrada [ $^{\circ}C$ ]	Rango de temperaturas a la salida [ $^{\circ}C$ ]
1 captador	188.26	22.1 - 59.9	49.4 - 75.3
	252.89	26.4 - 53.7	48.4 - 57.6
	317.52	24.4 - 62.8	44.7 - 66.6
2 captadores	188.26	22.4 - 51.1	65.8 - 81.9
	252.89	18.6 - 49.3	59.3 - 76.9
	317.52	18.5 - 48.1	54.3 - 74.2
3 captadores	188.26	20.4 - 48.5	83.7 - 94.7
	252.89	23.1 - 48.3	70.4 - 82.8
	317.52	21.6 - 48.1	70.1 - 83.4

Tabla 6: Rango de temperaturas durante las pruebas de eficiencia térmica instantánea.

En la tabla 6 podemos observar como la temperatura a la salida tiene un mayor incremento con relación al número de captadores solares en serie, siendo los arreglos de 3 captadores los que alcanzan mayores temperaturas. Por otro lado los arreglos de un captador tienen menores incrementos de temperatura, alcanzando los  $75.3^{\circ}C$  como temperatura máxima.

Asimismo en la tabla se denota que, independientemente del número de captadores solares conectados en serie, los mayores incrementos de temperatura ocurren en las pruebas con flujo bajo como era de esperarse, siendo  $94.7^{\circ}C$  la máxima temperatura alcanzada.

## 4.2. Prueba del factor modificador del ángulo de incidencia

En la figura 34 se muestra el ajuste lineal realizado para los puntos de eficiencia térmica instantánea, resultado de la prueba que se realizó con las inclinaciones de 10 a 60° antes y después del mediodía solar.

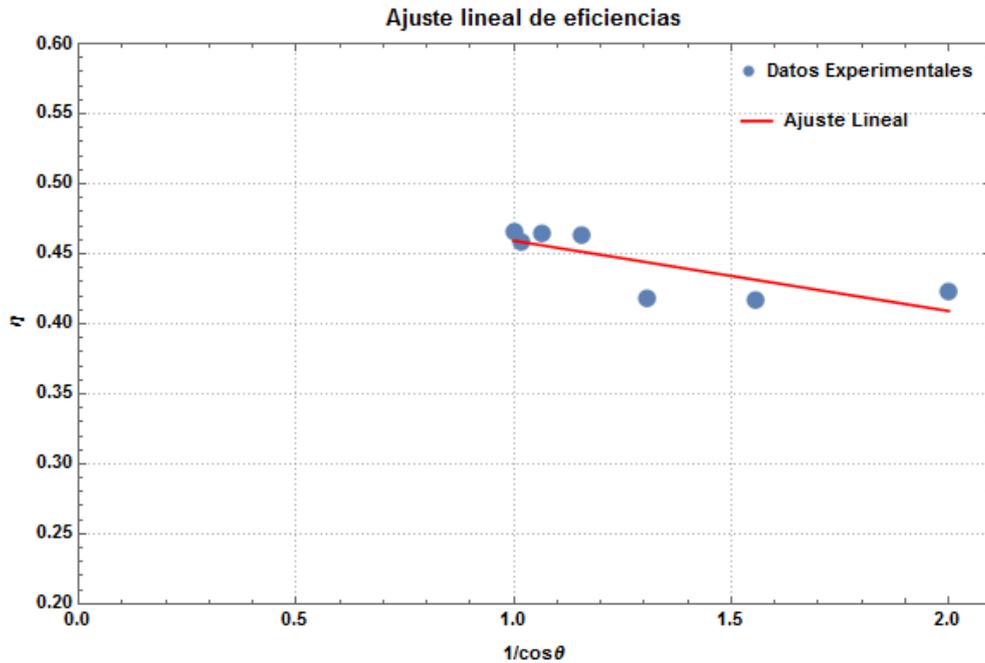


Figura 34: Ajuste lineal de la prueba de modificador de ángulo de incidencia.

El ajuste lineal dió como resultado la siguiente ecuación:

$$y = 0.509536 - 0.050218x$$

Tomando los datos  $a = 0.509536$  y  $b = -0.050218$  podemos calcular el coeficiente  $b_0$  con la ecuación (11):

$$b_0 = -0.0897144$$

Finalmente podemos sustituir el valor  $b_0$  en la ecuación (10).

$$K_{\tau\alpha} = 1 + (-0.050218) \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)$$

Los resultados se muestran en la figura 35

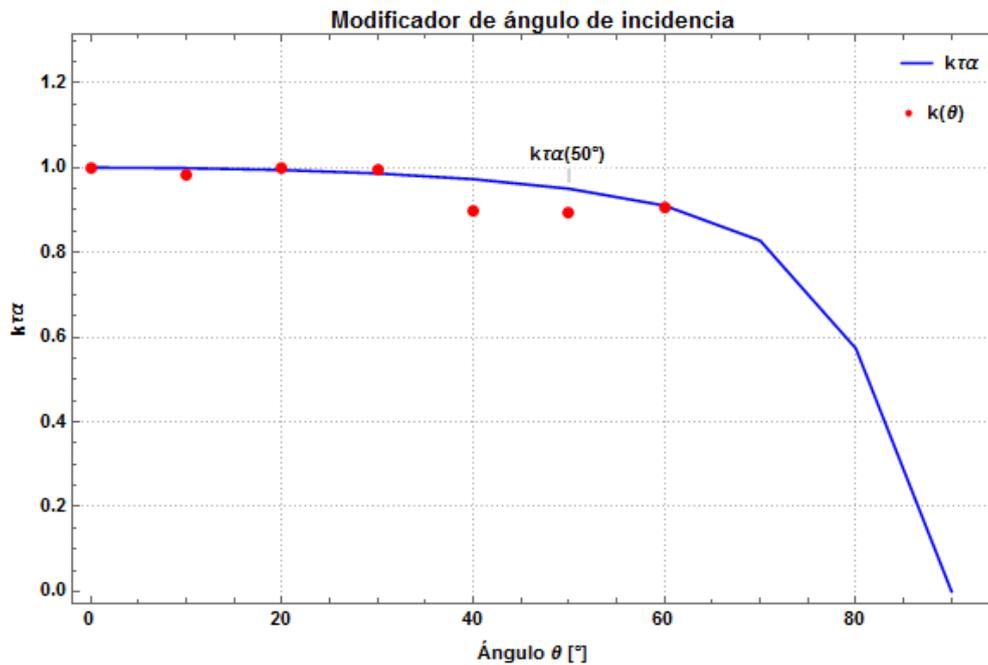


Figura 35: Modificador de ángulo de incidencia

En la figura 35 podemos observar en los puntos de  $k(\theta)$  como la relación de la eficiencia térmica instantánea conforme el ángulo de radiación solar cambia. Podemos observar que durante los primeros 30 grados de inclinación la eficiencia tiene un cambio mínimo, sin embargo, a partir de 40 grados de inclinación podemos observar una caída de eficiencia térmica instantánea cercana al 10%. Además, cuando la inclinación es de 60 grados se puede apreciar un pequeño incremento en la eficiencia. Tanto la caída de eficiencia e incremento de la misma se puede atribuir a errores experimentales, además de la inclinación del ángulo solar y el decremento de la irradiancia.

La prueba del factor modificador del ángulo de incidencia, a diferencia de las pruebas de caída de presión y eficiencia térmica instantánea, solo se realizó con un captador. Esto se debe a que como los captadores son idénticos se tendría la misma pérdida porcentual de eficiencia con el cambio del ángulo solar respecto a la superficie del captador con uno, dos y tres captadores conectados en serie.

En cuanto el modificador de ángulo de incidencia para radiación directa se reporta un valor de  $k_{\tau\alpha}(50^\circ) = 0.95$ .

### 4.3. Caída de presión

En las figuras 36, 37 y 38 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de caídas de presión. En las 3 figuras se puede observar un comportamiento similar en el cual las caídas de presión aumentan conforme aumenta el flujo volumétrico al que se realiza la prueba. El comportamiento de las caídas de presión puede ser atribuido a la conexión de los sistemas de medición y tuberías que se encuentran a la salida del difusor.

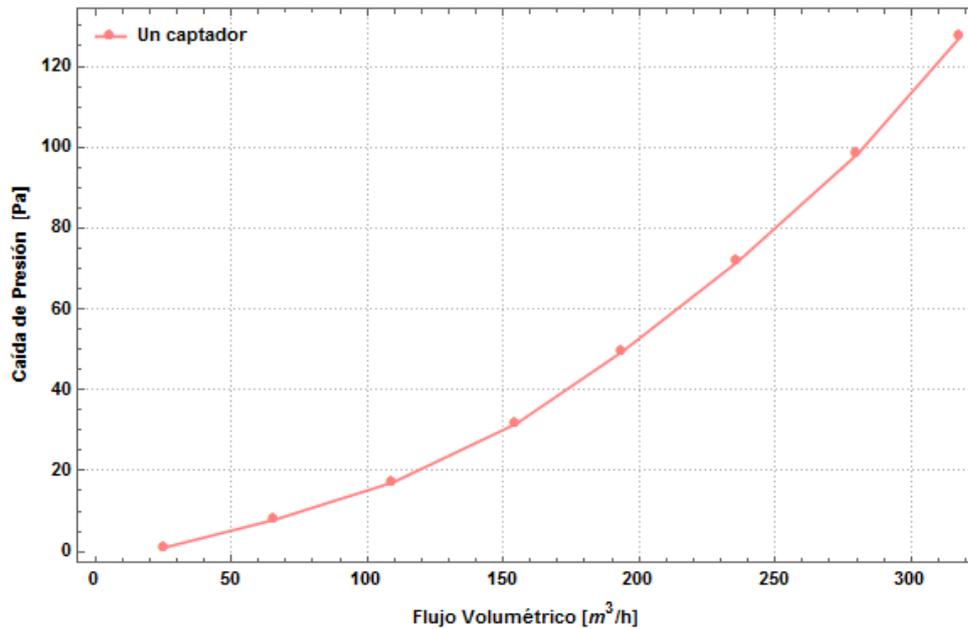


Figura 36: Caídas de presión de un captador

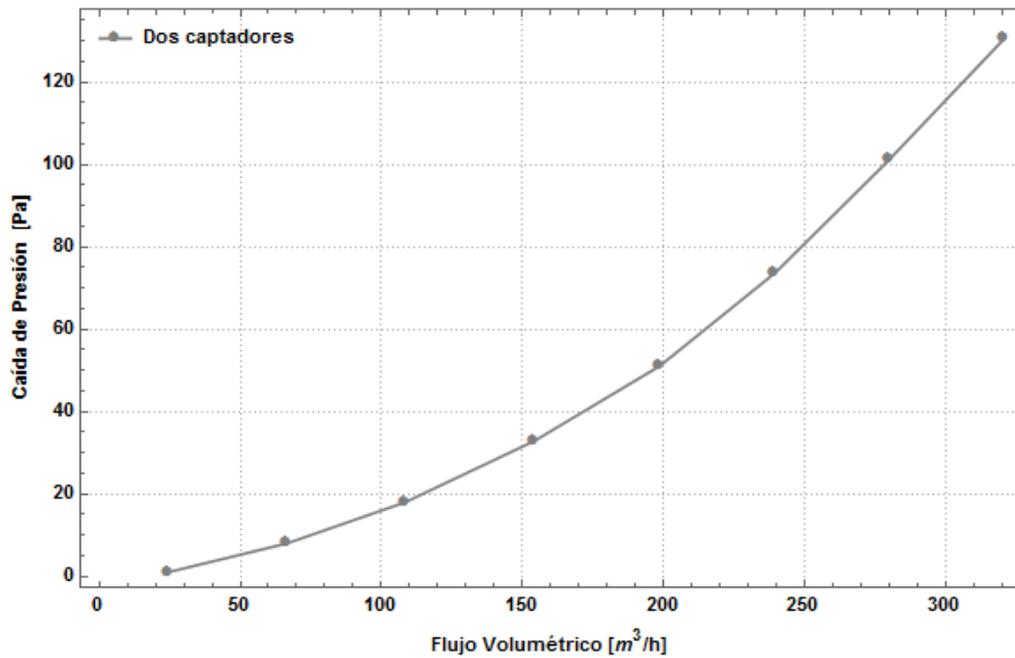


Figura 37: Caídas de presión de dos captadores en serie

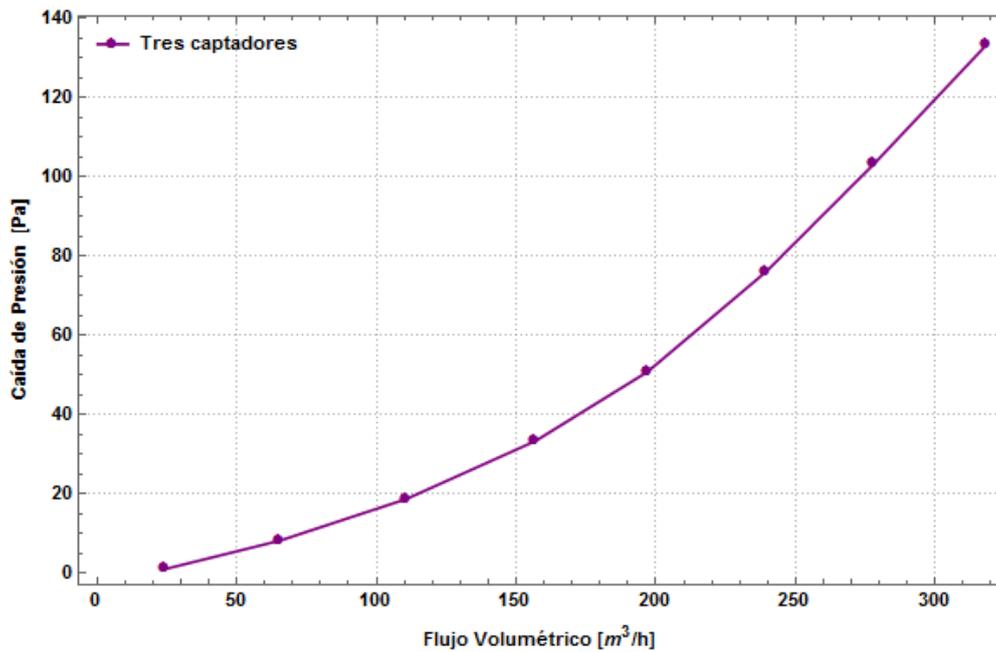


Figura 38: Caídas de presión de tres captadores en serie

Como se muestra en la figura 39, al comparar la caída de presión en los 3 arreglos con los que se realizaron las pruebas (uno, dos y tres captadores en serie) podemos observar que existe una diferencia muy pequeña entre dichos arreglos.

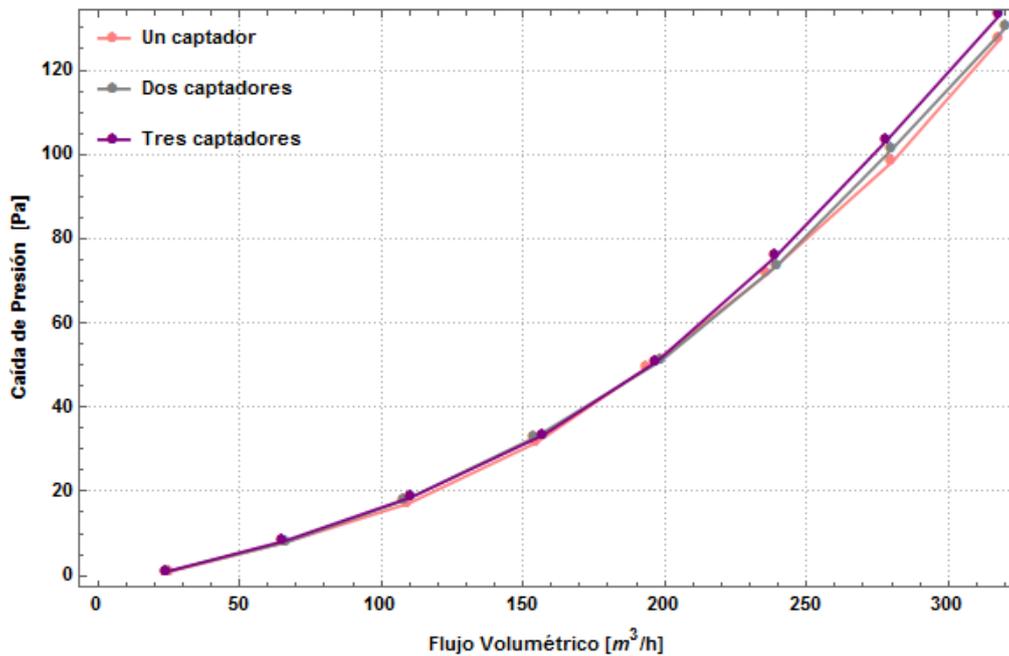


Figura 39: Caídas de presión de uno, dos y tres captadores en serie

Dado que los resultados no son los que se esperaban, se optó por realizar las mediciones de caída de presión del difusor que se encuentra a la salida del captador. Los resultados se muestran en la figura 40.

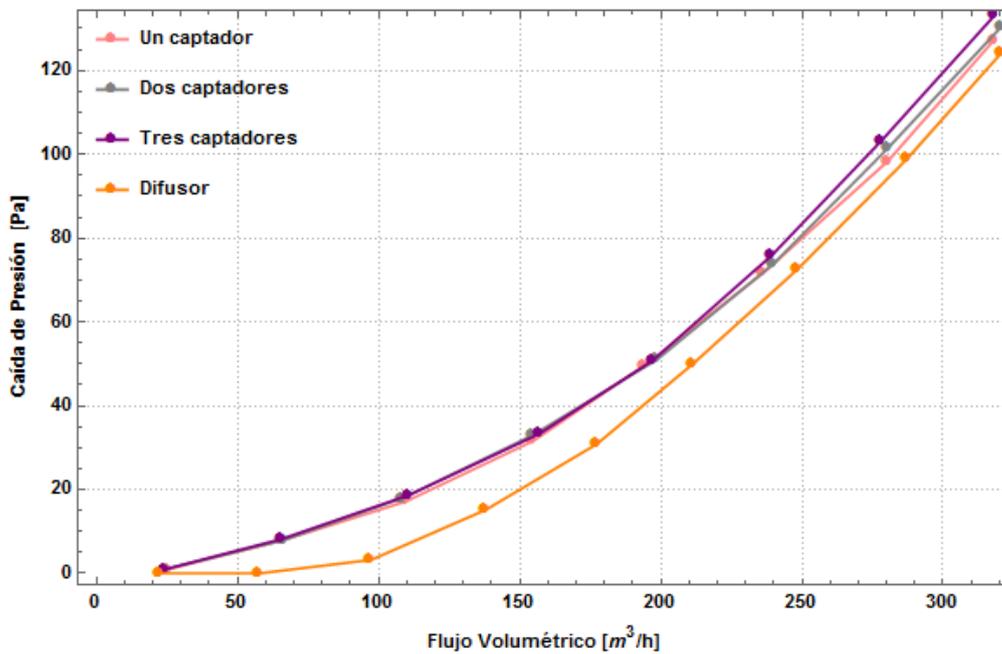


Figura 40: Comparación de caída de presión en los captadores y en el difusor.

En la figura 40 podemos observar la caída de presión en el difusor a la salida del captador, la cual al ser comparada con las caídas de presión mostradas anteriormente se puede notar que a través del sistema se tiene la mayor caída de presión en el difusor, haciendo que las caídas de presión en los captadores sean de menor importancia.

## 5. Conclusiones

- Se logró el objetivo general del presente trabajo cuya finalidad es la caracterización térmica de un sistema de captadores para calentamiento de aire mediante sus curvas de eficiencia. Asimismo se cumplieron los objetivos específicos.
- Se desarrollaron las pruebas experimentales para la caracterización térmica de una serie de captadores solares para calentamiento de aire bajo los protocolos de la norma ISO 9806:2013 captadores solares térmicos. Métodos de ensayo
- Se analizó el cambio de eficiencia térmica instantánea de cada captador bajo diferentes condiciones de operación como lo son el flujo volumétrico de aire y el número de captadores en serie. Se concluye que el aumento en el número de captadores en serie reduce la eficiencia térmica instantánea del sistema pero aumenta las temperaturas a la salida del mismo. Además se concluye que el incremento del flujo volumétrico a través del sistema propicia un aumento de eficiencia térmica instantánea, sin embargo, también aumentan las pérdidas al ambiente lo que provoca una mayor pendiente en las curvas de eficiencia instantánea.
- En cuanto al análisis de las pruebas de caída de presión, las caídas de presión aumentan en función del incremento del flujo volumétrico. Además podemos concluir que las caídas de presión no tienen un cambio significativo ligado al número de captadores conectados en serie, ya que la mayor caída de presión es debida al difusor que se tiene a la salida del sistema.
- Se analizaron los resultados experimentales para las pruebas del modificador de ángulo de incidencia en las que podemos concluir que la eficiencia tiene un cambio mínimo en inclinaciones menores a los  $30^\circ$  y pérdidas cercanas a un 10 % para ángulos que van de los  $40^\circ$  a los  $60^\circ$  respecto a la perpendicular del captador.
- Se comprobó la hipótesis demostrando que los captadores solares de aire pueden ser usados para la entrega de energía térmica para el acondicionamiento de espacios teniendo eficiencias que van desde el 30 % hasta el 63 %, dependiendo de las condiciones de operación, así como las temperaturas y humedades del aire ambiente durante el uso en sistemas de secado solar.
- Con los parámetros obtenidos (eficiencia térmica instantánea, ángulo de incidencia y caída de presión) es posible dimensionar y diseñar un sistema bajo condiciones reales de operación de acuerdo a las necesidades de un usuario final.

### Sugerencias y trabajo a futuro

- El difusor a la salida del captador debe presentar un rediseño pensando en una repartición más uniforme del flujo a través de los diferentes canales, así como en disminuir la caída de presión que presenta. Cabe mencionar que el difusor sufrió daños antes de lo esperado por el desgaste que sufre por la radiación incidente y por su propio peso, por lo que sería conveniente cambiar el material y la forma en la que el difusor se sostiene del captador.
- Cuantificar la incertidumbre experimental de los resultados obtenidos.
- Hacer un software para el estudio técnico económico de sistemas de deshidratado o calefacción solar para evaluar los arreglos y costos finales asociados a esta tecnología.

## 6. Bibliografía

1. Ren 21, 2017. *Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable*. Recuperado de [http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/#sub\\_2](http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/#sub_2). Consultado el 7 de mayo de 2019.
2. Ren 21, 2018. *Renewables 2018, Global status Report*. Recuperado de [http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/#sub\\_2](http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/#sub_2). Consultado el 7 de mayo de 2019.
3. Solar Heat Worldwide, 2018. *Global Market Development and Trends in 2017*. Recuperado de <http://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2018.pdf>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
4. SENER, 2017. *Reporte de Avances de Energías Limpias 2017*. SENER, 2017. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte\\_de\\_Avance\\_de\\_Energias\\_Limpias\\_Cierre\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/354379/Reporte_de_Avance_de_Energias_Limpias_Cierre_2017.pdf). Consultado el 7 de mayo de 2019.
5. SENER, 2017. *Balance Nacional de Energía 2016*. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2016\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf). Consultado el 7 de mayo de 2019.
6. García V. Octavio, Pilatowsky F. Isaac (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industria*. Conacyt. Ciudad de México, México.
7. International standard ISO9806:2013 Solar energy - solar thermal collectors - test methods.
8. Butti K., Perlin J.; tr. Corral J. *Un hilo dorado: 2500 años de arquitectura y energía solar.*, H. Blume. Madrid, España, 1985.
9. Instituto de Energías Renovables, nd. *Planta solar deshidratadora en Zacatecas*. Recuperado de [www.fordecyt.ier.unam.mx/html/termosolar\\_planta\\_deshidratadora\\_chile\\_2.html](http://www.fordecyt.ier.unam.mx/html/termosolar_planta_deshidratadora_chile_2.html). Consultado el 7 de mayo de 2019.
10. Grammer Solar, nd. *Historia de Grammer Solar*. Recuperado de <https://www.grammer-solar.com/es/empresa/historia.html>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
11. SolarWall by Conserval Engineering, nd. *Información de la empresa*. Recuperado de <http://solarwall.com/es/inicio.php>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
12. SAECSA, nd. *Quiénes somos*. Recuperado de <https://saecsaenergiasolar.com/nosotros/>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
13. Módulo Solar, nd. *La Empresa - Módulo Solar*. Recuperado de <https://modulosolar.com/mx/la-empresa/>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
14. Duffie J. A., Beckman W. A., *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, 2013.
15. Sitio Solar, nd. *La calefacción solar por colectores de aire*. Recuperado de <http://www.sitiosolar.com/la-calefaccion-solar-por-colectores-de-aire/>. Consultado el 7 de mayo de 2019.
16. García V. Octavio, Pilatowsky F. Isaac, et al, 2015. *Calentador solar de aire tipo modular*. Patente WO2017061850A1, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/WO2017061850A1/es?q=calentador&q=solar+de+aire&q=tipo&q=modular&oq=calentador+solar+de+aire+tipo+modular>. Consultado el 7 de mayo de 2019.

17. Norma Mexicana: NMX-ES-001-NORMEX-2005. *Energía solar - Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua - Métodos de prueba y etiquetado.* (Publicación de declaratoria de vigencia en el DOF: 15 de agosto de 2005; vigente a partir del 14 de octubre de 2005).

## 7. Apéndices

### 7.1. Apéndice A: Especificaciones técnicas del captador solar

Tabla 7: Dimensiones, materiales y condiciones ambientales del calentador solar para de aire.

Parámetro	Valores
<b>Dimensiones</b>	
Ancho, largo, alto (bruto) [ $m$ ]	1.21, 2.09, 0.094
Ancho, largo (apertura) [ $m$ ]	1.11, 2.08
Espacio absorbedor-cubierta [ $m$ ]	0.05
<b>Material de ductos</b>	acero galvanizado pintado
Número de ductos	21
Altura, ancho, espesor [ $m$ ]	0.025, 0.05, 0.001
Conductividad térmica [ $W/mK$ ]	52.0
Superficie selectiva	pintura negra
Emisividad, absortancia	0.9, 0.9
<b>Material de cubierta</b>	vidrio templado
Número de cubiertas	1
Espesor [ $m$ ]	0.0032
Transmitancia, emisividad,	0.9, 0.88
Índice de refracción	1.526
Conductividad térmica [ $W/mK$ ]	1.0
<b>Material de aislante inferior y lateral</b>	poliuretano
Conductividad térmica [ $W/mK$ ]	0.02691
Emisividad de aislante inferior y lateral	0.92
Espesor de aislante inferior [ $m$ ]	0.044
Espesor de aislante lateral [ $m$ ]	0.05
<b>Material caja externa</b>	acero galvanizado
Espesor [ $m$ ]	0.0005
Conductividad térmica [ $W/mK$ ]	52
Emisividad	0.04
<b>Condiciones de operación</b>	
Fluido de trabajo	aire del ambiente
Rango de temperatura ambiental [ $^{\circ}C$ ]	28-35
Rango de humedad relativa de entrada [%]	25-28
Rango de irradiancia solar [ $W/m^2$ ]	950-1060
Ángulo de inclinación del captador	15 $^{\circ}$
Flujo másico bajo, medio y alto [ $kg/s$ ]	0.048, 0.065, 0.082
Captadores conectados en serie	1, 2, 3