



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

*“Desarrollo de una pintura absortiva-
radiativa a partir de escoria de aceración
para colectores solares”*

TESIS PROFESIONAL
Para obtener el título de:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
Arizmendi Martínez Filiberto Samuel

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Alejandro de la Cruz Rogel Ramírez

FES Zaragoza, CDMX, Junio 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que al alumno(a) Arizmendi Martínez Filiberto Samuel. con número de cuenta 10700085-3 de la carrera Ingeniería Química, se le ha fijado el día 14 del mes de Junio de 2019 a las 17:00 horas para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	Q. MARTHA ORTIZ ROJAS
VOCAL	DR. ALEJANDRO DE LA CRUZ ROGEL RAMÍREZ
SECRETARIO	DR. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO
SUPLENTE	M. EN E. BALBINA PATRICIA GARCÍA AGUILAR
SUPLENTE	I.Q. ANDREA HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

El título de la tesis que se presenta es: **Desarrollo de una pintura adsorbtiva-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares.**

Opción de Titulación: Convencional

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CDMX; a 30 de Mayo de 2019.

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD
DIRECTOR

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA" DIRECCIÓN

RECIBÍ:
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
Y DE GRADO

Vo.Bo.

M. EN C. CESAR SAÚL VELASCO HERNÁNDEZ
JEFE DE LA CARRERA DE I.Q.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia quienes me han apoyado incansablemente para lograr este objetivo y por qué sé que sin ellos nunca lo habría podido realizar, sabiendo de antemano que jamás podre pagar todo el sacrificio y amor que he recibido de su parte.

A mi madre Judith por ser mi maestra todos estos años, enseñándome que nada es difícil con constancia y disciplina, siempre siendo mi ejemplo a seguir.

A mi padre Filiberto que a pesar de todo siempre ha estado a mi lado apoyándome y ayudándome, además de brindarme en todo momento su confianza.

A mi hermana Areli y mi cuñado Anthuan quienes siempre me han dado sabios consejos y me han brindado su ayuda sin dudarlos cada vez que se los he pedido.

A mi hermana Zabdi por ser mi confidente y compañera de juegos todos estos años además de ser fiel testigo de las horas de desvelo y esfuerzo que pase durante la carrera.

A mi novia Stephanie por estar a mi lado estos años dándome ánimos y apoyándome en los momentos difíciles, además de brindarme su amor. Te amo.

A mis amigos, quienes para mí son como hermanos gracias por su amistad incondicional, quienes son parte de todo lo que la UNAM me ha dado.

Agradecimientos

Primeramente doy gracias a Dios por todo lo que me ha dado en la vida y dejarme saber que todas las cosas son para mi bien y tienen un propósito.

Agradezco a la UNAM por ser mi segunda hogar y acogerme desde que era un niño, por brindarme la oportunidad de tener estudios.

A la FES Zaragoza por darme la oportunidad de desarrollarme como ingeniero, además de aportarme las herramientas e instalaciones necesarias para realizar este trabajo.

A mis compañeros y profesores de la carrera de Ingeniería Química y de la ENP 2 por que sin ellos jamás hubiera podido desarrollarme como la persona que soy.

A la profesora María Antonieta Pérez Nova quien me ayudo en la parte estadística de este trabajo, además de regalarme horas de su tiempo explicándome.

A mi director de tesis el Dr. Alejandro de la Cruz Rogel Ramirez por permitirme trabajar en su proyecto y facilitarme todas las herramientas necesarias para poder realizar el trabajo.

Contenido

Lista de imágenes	iii
Lista de tablas	v
Lista de gráficas	vii
Resumen	ix
Introducción	x
Objetivos	xii
Capítulo 1 Antecedentes	
Historia de los colectores solares	2
1.1.2 Abandono temporal de la energía solar	3
1.1.3 Resurgimiento de la energía solar	3
1.1.4 El primer calentador de agua solar comercial	3
1.2 Las energías renovables	4
1.2.1 Energías renovables en el mundo	4
1.3 Energía solar	5
1.3.1 Energía solar térmica	6
1.3.2 Energía solar fotovoltaica	7
1.4 Energía eólica	9
1.5 Energía geotérmica	11
1.7 Energía biomásica	13
1.8 Energía mareomotriz	14
1.9 Energía de las olas	14
1.10 Energía hidráulica	15
1.11 Energías Renovables en México	16
1.11.1 Energía fotovoltaica	17
1.11.2 Energía eólica	18
1.11.3 Energía geotérmica	19
1.11.4 Energía biomásica	19
1.11.5 Energía hidroeléctrica	21
Capítulo 2 Colectores solares	
2.1 La radiación solar y los colectores solares	23
2.2 Tipos de colectores solares	23
2.2.1 Colector de placa plana	23
2.2.2 Colectores solares sin cubierta	25

2.2.3 Colectores solares de aire	26
2.2.4 Colectores de tubo vacío	27
2.2.5 Colectores cónicos	27
2.3. Pruebas a colectores solares	28
2.4 Concentradores solares	32
2.4.1 Concentradores Cilíndrico Parabólicos	32
2.4.2 Concentradores de espejos lineales Fresnel	35
2.4.3 Concentradores con disco/motor	38
2.4.4 Sistemas de torres de potencia	40
Capítulo 3 Construcción y pruebas de un solarímetro	
3.1 Solarímetro	44
3.2 Material absorbente	44
3.2.1 Análisis de escoria BOF	45
3.3 Construcción del solarímetro	47
3.4 Resultados de las pruebas con solarímetro	50
Capítulo 4 Prototipo experimental	
4.1 Construcción del prototipo	59
4.2 Instalación del prototipo	62
4.3 Análisis térmico del prototipo de colector solar	64
Capítulo 5 Análisis de resultados	
5.1 Resultados de las pruebas con el prototipo de colector solar plano	73
5.2 Resultados del análisis térmico del sistema	75
5.3 Análisis estadístico de los datos	81
Conclusiones	88
Anexo	
• Código Matlab para el análisis en estado estable de un colector solar de placa plana	90
Referencias bibliográficas	93

Lista de Imágenes

Imagen 1.1: Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo total final de energía

Imagen 2.1: Elementos que componen un colector solar de placa plana

Imagen 2.2: Colector solar sin cubierta

Imagen 2.3: Colector solar de aire

Imagen 2.4: Colector solar de tubo vacío

Imagen 2.5: Funcionamiento de un colector solar de tubo vacío

Imagen 2.6: Colector cónico

Imagen 2.7: Concentrador cilíndrico parabólico

Imagen 2.8: Planta termosolar Solana Generating Station, de 280 MWe, desierto de Gila, Arizona, EUA [Abengoa, 2014]

Imagen 2.9: Planta de Ciclo Combinado Integrado con Campo Solar, Agua Prieta II, con un campo de colectores parabólicos de 14 MWe.

Imagen 2.10: Concentrador de espejos lineales Fresnel

Imagen 2.11: Reflector lineal Fresnel. [Areva solar, 2012]

Imagen 2.12: Planta Termosolar de espejos lineales Fresnel, Thermosolar Power Plant Puerto Errado 2, Murcia, España, 2012

Imagen 2.13: Planta Dhursar, en Rajasthan, India de 125 MWe, 2014

Imagen 2.14: Concentrador con Disco/Motor

Imagen 2.15: Planta solar Maricopa Solar Project, 1.5 MWe, California, EUA

Imagen 2.16: Sistema de torres de potencia

Imagen 2.17: Planta solar Ivanpah Solar Electric System (ISEGS) en California, EUA.

Imagen 2.18: CSP Crescent Dunes, de 110MW, en Tonopah (Nevada)

Imagen 3.1: Escoria de aceración

Imagen 3.2: Escoria tipo (BOF)

Imagen 3.3: Molino de martillos

Imagen 3.4: Tamices con escoria de aceración

Lista de Imágenes (continuación)

Imagen 3.5: Tapones de 2 pulgadas de diámetro

Imagen 3.6: Mezcla de escoria de aceración, adhesivo y limadura de cobre

Imagen 3.7: Tubo cubierto por la pintura absorbente radiativa

Imagen 3.8, 3.9: Solarímetro en funcionamiento

Imagen 4.1: Placa absorbente de 20 tubos de cobre de ½ pulgada antes del recubrimiento

Imagen 4.2: Placa absorbente hecha por escoria de aceración, limadura de cobre y un adhesivo

Imagen 4.3: Caja de lámina galvanizada

Imagen 4.4: Carcasa recubierta por fibra de vidrio, y dentro la placa absorbente

Imagen 4.5: Fibra de vidrio

Imagen 4.6: Carcasa recubierta por fibra de vidrio, dentro la placa absorbente, y cubierta por una capa de vidrio

Imagen 4.7: Tanque de almacenamiento vista lateral

Imagen 4.8: Tanque de almacenamiento vista de una de las tapas

Imagen 4.9: Soporte antes de la instalación

Imagen 4.10: Soporte durante la instalación

Imagen 4.11: Termómetros instalados en la carcasa del prototipo

Imagen 4.12: Termómetros instalados en el tanque de almacenamiento

Imagen 4.13: Instalación de una manguera a la carcasa del prototipo

Imagen 4.14: Prototipo de colector solar en funcionamiento

Imagen 4.15: Análisis térmico de un colector solar de placa plana

Imagen 4.16: Distribución de los termómetros en el tanque de almacenamiento

Imagen 4.17: Distribución de los termómetros en la placa y salidas de la carcasa

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Composición de la escoria tipo BOF

Tabla 3.4.1: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 6/11/2018

Tabla 3.4.2: Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 14/04/2011

Tabla 3.4.3: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 8/11/2018

Tabla 3.4.4: Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 26/04/2011

Tabla 3.4.5: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 21/01/2019

Tabla 3.4.6: Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 28/04/2011

Tabla 3.4.7: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 22/01/2019

Tabla 3.4.8: Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 3/04/2011

Tabla 3.4.9: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 23/01/2019

Tabla 3.4.10: Datos de solarímetro material cuerpo gris 31/09/2018

Tabla 3.4.11: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 28/01/2019

Tabla 3.4.12: Datos de solarímetro material cuerpo gris 20/09/2018

Tabla 3.4.13: Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 31/01/2019

Tabla 3.4.14: Datos de solarímetro material cuerpo gris 17/09/2018

Tabla 5.1: Datos de Temperatura prototipo de colector solar 07/12/2018

Tabla 5.2. Datos de Temperatura prototipo de colector solar 29/01/2019

Tabla 5.3. Datos de Temperatura prototipo de colector solar 31/01/2019

Lista de Tablas (continuación)

Tabla 5.4. Datos de Temperatura, coeficientes de: convección, radiación, y eficiencia de prototipo de colector solar 07/12/2018

Tabla 5.5. Datos de Temperatura, coeficientes de: convección, radiación, y eficiencia de prototipo de colector solar 29/01/2019

Tabla 5.6. Datos de Temperatura, coeficientes de: convección, radiación, y eficiencia de prototipo de colector solar 31/01/2019

Tabla 5.7. Promedio de calor útil y eficiencia térmica global de todos los días de prueba

Tabla 5.8.1 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Tabla 5.8.2 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

Tabla 5.9.1 Promedio de temperatura inicial y final con su desviación típica

Tabla 5.9.2 Prueba ANOVA para temperatura

Tabla 5.9.3 Prueba robusta para temperatura

Tabla 5.10.1. Datos descriptivos del calor útil total

Tabla 5.10.2. Prueba ANOVA para el calor útil total

Tabla 5.10.3. Prueba robusta de igualdad de las medias para el calor útil total

Tabla 5.11.1. Datos descriptivos de la eficiencia térmica global del sistema

Tabla 5.11.2. Prueba de homogeneidad de varianzas

Tabla 5.11.3. Prueba ANOVA

Lista de Gráficas

Gráfica 1.1: Capacidades de energía renovable en el mundo, los seis países líderes 2016

Gráfica 1.2: Capacidad global de colectores solares de calentamiento de agua

Gráfica 1.3: Adiciones de colectores solares para calentamiento de agua, 20 países líderes por capacidad añadida, 2016

Gráfica 1.4: Capacidad mundial de energía solar FV y adiciones anuales 2006-2016

Gráfica 1.5: Capacidad mundial de energía solar FV, por país y región 2006-2016

Gráfica 1.6: Capacidad mundial de energía eólica y adiciones anuales 2006-2016

Gráfica 1.7: Capacidad de energía eólica y adiciones, 10 países, 2016

Gráfica 1.8: Capacidad de energía geotérmica y adiciones, 10 países líderes, 2016

Gráfica 1.9: Generación mundial con bioenergía, por región, 2006-2016

Gráfica 1.10: Capacidad de energía hidroeléctrica y adiciones, los 10 principales países en capacidad agregada 2017

Gráfica 1.11: Oferta interna bruta por tipo de energético, 2017 (Petajoules)

Gráfica 1.12: Generación con energías renovables (GWh) del 1 de enero al 30 de junio de 2018

Gráfica 1.13: Evolución histórica de la energía fotovoltaica en México 2004-2018

Gráfica 1.14: Evolución histórica de la energía eólica en México 2004-2018

Gráfica 1.15: Evolución histórica de la energía geotérmica en México 2004-2018

Gráfica 1.16: Evolución histórica de la energía biomásica en México 2004-2018

Gráfica 1.17: Evolución histórica de la energía biomásica (biogás) en México 2004-2018

Gráfica 1.18: Evolución histórica de la energía hidroeléctrica en México 2004-2018

Gráfica 3.4.1: Primera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Gráfica 3.4.2: Segunda comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Gráfica 3.4.3: Tercera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Lista de Gráficas (continuación)

Gráfica 3.4.4: Cuarta comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Gráfica 3.4.5: Primera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris

Gráfica 3.4.6: Segunda comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris

Gráfica 3.4.7: Tercera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris

Gráfica 5.1. Calor útil de 3 mejores días de prueba

Gráfica 5.2. Eficiencia térmica global de 3 mejores días de prueba

Gráfica 5.3. Calor útil de todos los días de prueba

Gráfica 5.4. Eficiencia térmica global de todos los días de prueba

Gráfica 5.5. Temperatura inicial y final del experimento

Gráfica 5.6. Gráfica de barras de error con un intervalo de confianza al 95% para la temperatura inicial y final de las pruebas

Gráfica 5.7. Calor útil del sistema al inicio y final de las pruebas

Gráfica 5.8. Barras de error al 95% de confianza para el calor útil del sistema

Gráfica 5.9 Eficiencia térmica global al inicio y final de las pruebas

Resumen

En México como en el resto del mundo desde hace algunos años se está dando difusión a la utilización de energías renovables, no solo a escalas industriales sino que los miembros de la sociedad quieren contribuir a la no contaminación del planeta con este cambio a las energías limpias, tratando de no seguir dependiendo de las energías no renovables y esto se puede ver reflejado actualmente, ya que cada día es más común ver por ejemplo el uso de carros híbridos, la utilización de paneles solares en lámparas públicas, albercas con calentadores solares, casas con colectores solares para el uso de agua sanitaria, etc.

Por lo que este trabajo se enfocó en el aprovechamiento de la energía solar térmica con la construcción de un prototipo de colector solar plano tipo sifón con capacidad de 30 litros, en donde se propone el uso de un nuevo material, el cual es una pintura absorbente radiativa a base de escoria de aceración que sirve para recubrir la placa absorbente del prototipo de colector. Además, con este material se le da un nuevo uso a la escoria de aceración; la cual, es sólo un residuo en la fabricación de aceros.

Para comprobar que este nuevo material, en verdad ayuda al colector solar para mejorar su desempeño, se realizaron pruebas con un solarímetro casero, se obtuvieron datos de las temperaturas alcanzadas a lo largo de varios días. Estos datos se compararon con datos de otros materiales que de igual forma se utilizan para recubrir placas absorbentes, mostrando en algunos casos, ser mejor recubrimiento en la placa absorbente, la pintura absorbente radiativa a base de escoria de aceración.

El siguiente paso fue probar la pintura a base de escoria en la placa absorbente del prototipo de colector solar que se construyó. Después de hacer un análisis térmico del sistema en donde se obtuvo, el calor útil (la energía absorbida por el agua) y la eficiencia térmica global del prototipo de colector solar la cual varió entre el 40% y el 49% y recordando que la capacidad del prototipo fue de 30 litros, comparado con el 20% y 25% que es el valor de la eficiencia en la que oscilan los colectores solares comerciales que existen en el mercado, sabiendo que su capacidad es de unos 240 litros se puede estimar que si se llegase a usar la pintura absorbente radiativa a partir de escoria de aceración como recubrimiento en un colector solar térmico de una capacidad de 240 litros sería un buen recubrimiento y su eficiencia térmica sería considerada más alta en el mercado.

Por último, se hizo un análisis estadístico de los datos obtenidos del prototipo de colector solar plano como fueron la temperatura, el calor útil y la eficiencia térmica global, en donde se corroboró que el sistema funciona ya que los valores sufren un cambio ascendente al pasar el tiempo en el que están expuestos al sol sin importar que el día este soleado o nublado.

Introducción

Durante casi toda la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado las energías renovables como fuente de energía, no es hasta después de la revolución industrial cuando se inicia la utilización generalizada de los combustibles fósiles. Este último periodo, de unos 200 años, se ha caracterizado por un consumo creciente e intensivo de energía que prácticamente ha acabado con los combustibles fósiles.

Todo este intervalo de tiempo se ha caracterizado por la búsqueda por parte del hombre de nuevos artificios y combustibles que facilitasen su trabajo y mejorasen su nivel de vida, pero también por un crecimiento del consumo energético, al principio lentamente y en los últimos doscientos años de forma mucho más rápida, coincidiendo con un aumento del nivel de vida de los denominados países desarrollados. Uno de los problemas más severos derivados de este cambio de modelo energético ha sido el incremento de la contaminación que a su vez ha generado problemas graves de salud para el ser humano.

El sistema energético actual está fundamentalmente basado en los combustibles fósiles. El ritmo de consumo es tal que en un año la humanidad consume lo que la naturaleza tarda un millón de años en producir, por lo que el posible agotamiento de las reservas existentes es una realidad que no admite discusión.

En México tan solo el uso del boiler en el hogar representa el 80% del consumo del gas en casa habitación y esta necesidad es cubierta con el uso de gas LP o por el gas natural. Aunque las emisiones contaminantes del gas natural para uso residencial son prácticamente nulas en comparación con el gas LP y hasta 90% menores si se utiliza en automóviles, respecto a la gasolina diésel.

El uso de gas natural el cual se extrae directamente de la naturaleza, sin haberse sometido a ninguna transformación química, se ha comprobado que por la técnica de extracción llamada fracking es nociva en muchos sentidos, ya que consiste en generar fisuras en las rocas desde un pozo, y tiene por desventajas la contaminación sonora, la contaminación atmosférica y hasta puede ser la causante de temblores.

Tan solo en el país el total de barriles comprados a países extranjeros en 2017 representó el 71.58% de las ventas totales de combustible en México, las cuales fueron de 797.1 miles de barriles diarios. Respecto al gas natural, las ventas totales durante 2017 sumaron 2,623 millones de pies cúbicos diarios, mientras que las importaciones fueron de 1,766 millones de pies cúbicos diarios, es decir, el 67% de este hidrocarburo comercializado en México se trajo del extranjero.

El precio de dichos combustibles en el país es alto y aumenta más con el paso del tiempo, pero varias personas se han dedicado a la investigación y desarrollo de

tecnología para aprovechar las energías renovables para producir recursos que hagan que nuestras viviendas se vuelvan sustentables. Ya que es imposible negar que:

- ❖ La posibilidad de agotamiento del petróleo y del gas natural será una realidad en el plazo de 1 ó 2 generaciones.
- ❖ Las reservas de carbón son menos limitadas (y menos aún si se incluyen los carbones de muy mala calidad).

Por lo que es necesario regresar a la utilización de energías renovables, en donde el Sol es la principal fuente de energía, su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de las plantas, animales, en definitiva para que pueda haber vida sobre la Tierra, además de ser fundamental para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta.

Es por eso que este trabajo se enfoca en la energía solar térmica, aprovechada a través de colectores solares de baja temperatura los cuales abastecen agua sanitaria caliente para uso doméstico principalmente en casas.

El principio básico de funcionamiento de estos sistemas solares es sencillo: la radiación solar se capta y el calor se transfiere a un fluido (agua). Para aprovechar la energía solar térmica se usa el captador solar, también denominado colector o placa solar. El fluido calentado se puede usar directamente (por ejemplo, para bañarse, calentar agua en piscinas, etc.).

Algunas de sus principales ventajas son:

- ❖ Las instalaciones solares, cuentan con una vida útil media de 20 años, garantizan, en todos los casos el retorno de la inversión.
- ❖ El suministro de energía, sin emisión alguna de gases que provoquen el efecto invernadero, contribuyendo en la prevención del cambio climático.
- ❖ Eliminación de los costos adicionales del aumento del precio de la energía. Ya que los costos de los combustibles varían considerablemente a lo largo de la vida útil de la instalación, que es alrededor de 20 años. Por lo tanto, una instalación solar es siempre una inversión segura.
- ❖ Requiere un mantenimiento mínimo.
- ❖ Utilizan una fuente de energía prácticamente inagotable, reducen la factura energética de nuestro país, lo que representa una mayor independencia política y económica.

Problemática

En la época actual tanto en el país como en el resto del mundo la dependencia que se tiene a las fuentes de energía fósiles para el desarrollo y funcionamiento de la sociedad, es muy alta. Sin embargo, en las últimas décadas se ha creado conciencia de esta problemática. Por lo que el desarrollo de nuevas formas de aprovechar las energías renovables disponibles en nuestro país va en aumento.

Justificación

En la actualidad, el calor y la luz del Sol pueden aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica.

Por tal motivo se escogió el análisis de la energía solar ya que es una fuente inagotable de energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

Uno de los usos más comunes en la vida cotidiana es el uso de calentadores de agua por medio de gas, lo que actualmente se está tratando de cambiar por calentadores que utilicen la energía solar. Por tal motivo, se construyó primeramente un solarímetro para probar el comportamiento de una nueva fórmula absorbente-radiativa para posteriormente desarrollar un prototipo de calentador solar de placa plana con una capacidad de 30 litros de agua en el termotanque, con tubos metálicos, esto para analizar el cambio de temperatura del agua que se encuentra dentro de ellos para conocer así su eficiencia térmica. Así como, estudiar si se encuentra dentro de los valores promedio que ofrecen los calentadores solares comerciales, que oscila entre el 20 y 25%.

Objetivos generales

Desarrollar dentro de las instalaciones de la FES Zaragoza una nueva formulación absorbente-radiativa que pueda utilizarse como cuerpo negro en un captador térmico solar mejorando la eficiencia global de la placa absorbente.

Objetivos particulares

- 1.- Construir prototipo solar de placa plana
- 2.- Determinar la eficiencia térmica global del sistema
- 3.- Comparar el costo y analizar la eficiencia térmica del prototipo de colector solar con la de otros colectores solares comerciales.

Capítulo

I

“Antecedentes”



1.1 Historia de los colectores solares

A lo largo de la historia, el Sol siempre ha sido un elemento esencial para el desarrollo de la vida. Las culturas más primitivas se han ido aprovechando indirectamente y sin tener conciencia de ello, como eje fundamental de la vida humana, fue venerada por casi todas las civilizaciones antiguas.

En muchos casos, la arquitectura también guardaba una estrecha relación con el Sol, en la antigua Grecia, los dioses del Sol eran Helios y Apolo a quienes se les dedicaron incontables templos. También fueron los griegos los primeros en usar diseños de casas para aprovechar la luz del sol en forma pasiva, probablemente desde el año 400 A.C.⁽¹⁾.

Los romanos fueron los primeros en usar vidrio en sus ventanas para atrapar la luz solar en sus hogares. Incluso promulgaron leyes que penaban el bloquear el acceso de luz a los vecinos. Fueron los romanos los primeros en construir casas de cristal o invernaderos para crear condiciones adecuadas para el crecimiento de plantas exóticas o semillas que traían a Roma desde los lejanos confines del imperio.

Otra forma de aprovechamiento solar la desarrolló inicialmente Arquímedes. Entre sus inventos militares desarrolló un sistema para prender fuego a los barcos de las flotas enemigas utilizando espejos para concentrar la radiación solar en un punto.

Esta técnica siguió perfeccionándose, Lavoisier el gran químico francés, creó en 1792 un “horno solar”, consistía en dos potentes lentes que concentraban la radiación solar en un foco y que permitía alcanzar altas temperaturas con la que se podía fundir metales.

En 1867 el científico suizo Horace de Saussure desarrolló el primer colector solar. Horace Bénédicte De Saussure inventó el colector solar el cual tuvo una gran repercusión en la historia de la energía solar y en el desarrollo de la energía solar térmica de baja temperatura. A partir de su invento surgieron todos los desarrollos posteriores de calentadores solares de agua de placa plana, que han proporcionado agua caliente a millones de personas en el mundo.

Se trataba de “cajas calientes” hechas de madera y cristal con el objetivo de atrapar la energía solar. Se trataba del primer colector de energía solar térmica.

Más recientemente, hace un poco más de 100 años, el científico francés. Auguste Mouchout usó calor de un colector solar para producir vapor y mover un motor. Desgraciadamente, los elevados costos impidieron que su invento tuviera un uso comercial.

1.1.2 Abandono temporal de la energía solar

El uso de la energía solar perdió importancia en un momento de la historia. La tecnología solar se vio perjudicada por el bajo costo de los combustibles fósiles y la utilización de energías no renovables.

El crecimiento de la industria solar fue alto hasta mediados de los 50's. En este momento el costo de extracción de los combustibles fósiles como el gas natural y el carbón era muy bajo. Por este motivo el uso de la energía fósil pasó a tener una gran importancia como fuente energética y para generar calor. Se consideró entonces, la energía solar como cara y se abandonó para fines industriales.

En este momento de la historia no se tenía consciencia de los efectos negativos para el medio ambiente de uso de los combustibles fósiles y el efecto invernadero todavía no era un problema para el planeta.

1.1.3 Resurgimiento de la energía solar

El abandono, para fines prácticos, de la energía solar duró hasta los 70's. Las razones económicas volverían a poner a la energía solar en un lugar destacado en la historia. Pero en esos años el aumento en el precio de los combustibles fósiles del petróleo y gas natural llevó a un resurgimiento en el uso de la energía solar para calentar hogares y agua, así como en la generación de electricidad.

Además del precio, en el caso de los calentadores de agua de gas y carbón de los hogares, resultaban peligrosos ya que una mala combustión se podía generar gases tóxicos, como por ejemplo el monóxido de carbono.

1.1.4 El primer calentador de agua solar comercial

Fue patentado en 1891 por Clarence Kemp, era un fabricante de tuberías y calefactores. Puso un tanque de agua pintado de negro dentro de una caja cubierta con un vidrio. Conforme el fondo de la caja se calentaba, el agua más fría dentro del tanque absorbía el calor y se calentaba lo suficiente como para poder bañarse. Como California tiene mucho sol, a finales del siglo XIX muchos ciudadanos estuvieron dispuestos a pagar por tener agua caliente en casa y que no tenían una fuente barata para calentar el agua. El calentador de Kemp tenía un costo de 25 dólares⁽²⁾.

Se podría decir, que la primera empresa de instalación de equipos de energía solar térmica en el mundo fue fundada por Frank Shuman, que fundó en 1911 la empresa Sun Power Co, creando su primera planta solar en Tancony, USA generando un

total de 20kW. Tras ello abrió su siguiente planta solar en Maadi, Egipto, en 1912 consiguiendo generar 88kW.

Tenía un nuevo proyecto que era construir una planta solar capaz de generar toda la energía consumida por el mundo entero, planteo construir en el Sahara 52.600 km cuadrados de colectores solares para producir 198MW lo que era equivalente al consumo de energía mundial en el año 1909. Sin embargo el comienzo de la primera guerra mundial cambió todo y no llegó a terminarse.

1.2 Las energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles, de los que existen determinadas cantidades o reservas, agotables en un plazo más o menos determinado. Las principales formas de energías renovables que existen son: la biomasa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas. Las energías renovables provienen, de forma directa o indirecta, de la energía del Sol; con excepción de la energía geotérmica y la de las mareas ⁽³⁾.

Existe una creciente concientización a nivel mundial en lo que se refiere a la problemática energética, debido fundamentalmente a:

- La gran dependencia energética del exterior de los países industrializados.
- El agotamiento y encarecimiento de los recursos energéticos fósiles.
- Los recientes descubrimientos sobre el origen del cambio climático.

1.2.1 Energías renovables en el mundo

La situación mundial de energías revela que la transición mundial energética va por buen camino (Imagen 1.1). La nueva capacidad de energía renovable instalada

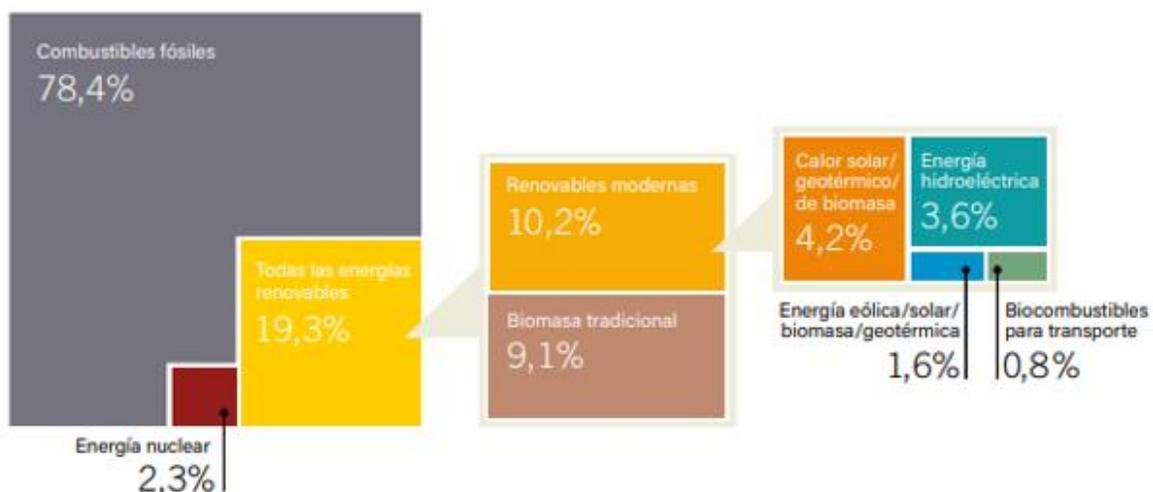
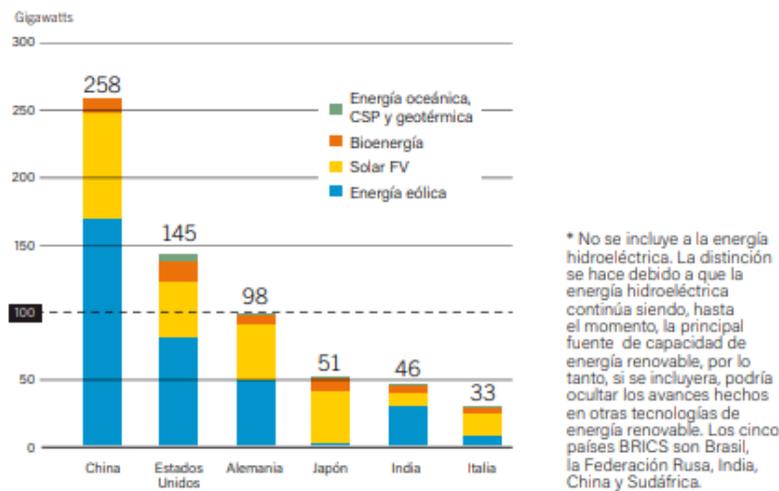


Imagen 1.1. Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo total final de energía

añadida ha roto record; los costos han disminuido de manera vertiginosa, especialmente los relacionados a la energía solar fotovoltaica (FV) y eólica; mientras que la división entre el crecimiento económico y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) se ha mantenido.

A pesar de las tendencias positivas, la transición no lleva la velocidad esperada para poder alcanzar las metas establecidas en el revolucionario Acuerdo de París adoptado en diciembre de 2015. En dicho acuerdo, los gobiernos se comprometieron de manera colectiva a mantener el aumento de la temperatura mundial por debajo de los 2°C con respecto a niveles pre-industriales, con el fin de mantenerlo en un límite más seguro de 1,5°C. Para este fin, durante 2016, 117 países adoptaron las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC's por sus siglas en inglés), en donde 55 de estas naciones presentaron objetivos en materia de energías renovables y 107 presentaron objetivos en materia de eficiencia energética. Aún así, la suma total de las promesas de contribución nacional se llevará más allá del límite de los 2°C. Las estimaciones más favorables oscilan entre los 2,3°C y 3,5°C ⁽⁴⁾.



Gráfica 1.1. Capacidades de energía renovable en el mundo, los seis países líderes 2016

1.3 Energía solar

El Sol, de forma directa o indirecta, es el origen de todas las energías renovables, exceptuando la energía maremotriz y la geotérmica. La energía del Sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética, llegando una parte de esta energía a la atmósfera. De esta energía que llega a la atmósfera, una parte es absorbida por la atmósfera y por el suelo, y otra parte es reflejada directamente al espacio desde el suelo. Es por esto por lo que menos de la mitad de la radiación

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

solar llega efectivamente a la superficie terrestre, siendo esta parte la se puede utilizar con fines energéticos en el planeta ⁽³⁾.

El Sol puede aprovecharse energéticamente de dos formas diferentes:

- Como fuente de calor: energía solar térmica de baja y media temperatura.
- Como fuente de electricidad: energía solar fotovoltaica y solar térmica de alta temperatura.

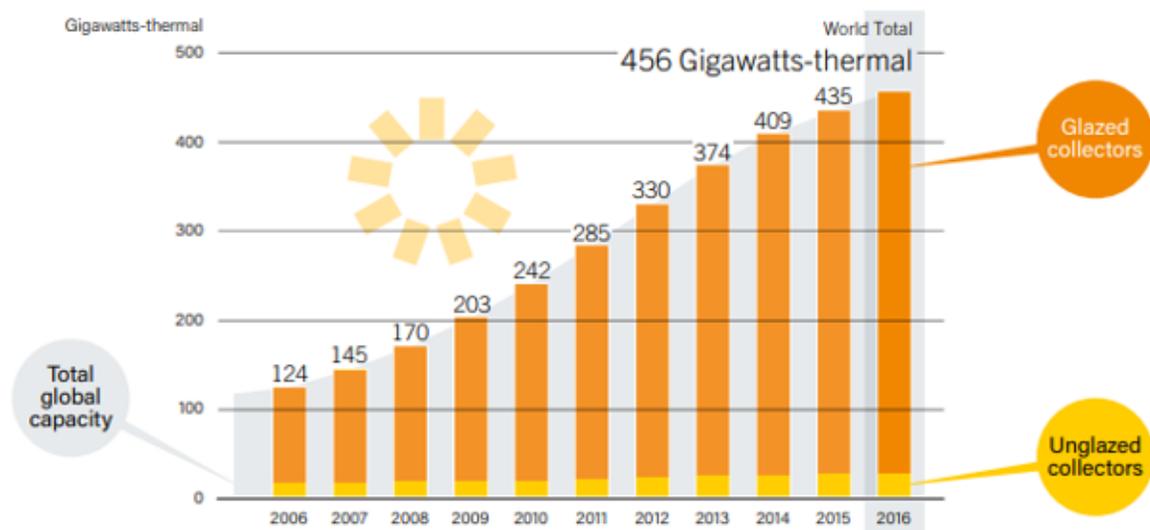
1.3.1 Energía solar térmica

La energía solar térmica se utiliza principalmente para calentar fluidos. Dependiendo de la temperatura final alcanzada por el fluido a la salida, las instalaciones se dividen en ⁽³⁾:

Baja temperatura: Son las más extendidas y se destinan a aquellas aplicaciones que no exigen temperaturas del agua superiores a los 90 °C, como, por ejemplo, la producción de agua caliente para uso doméstico, apoyo a la calefacción de viviendas, calentamiento de agua para piscinas, entre otras.

Media temperatura: Destinada a aquellas aplicaciones que exigen temperaturas del agua comprendidas entre 80 °C y 250 °C, por ejemplo, el calentamiento de fluidos para procesos industriales y la desalinización de agua de mar.

Alta temperatura: Destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas del agua superiores a los 250 °C, como es el caso de la generación de vapor para la producción de electricidad.

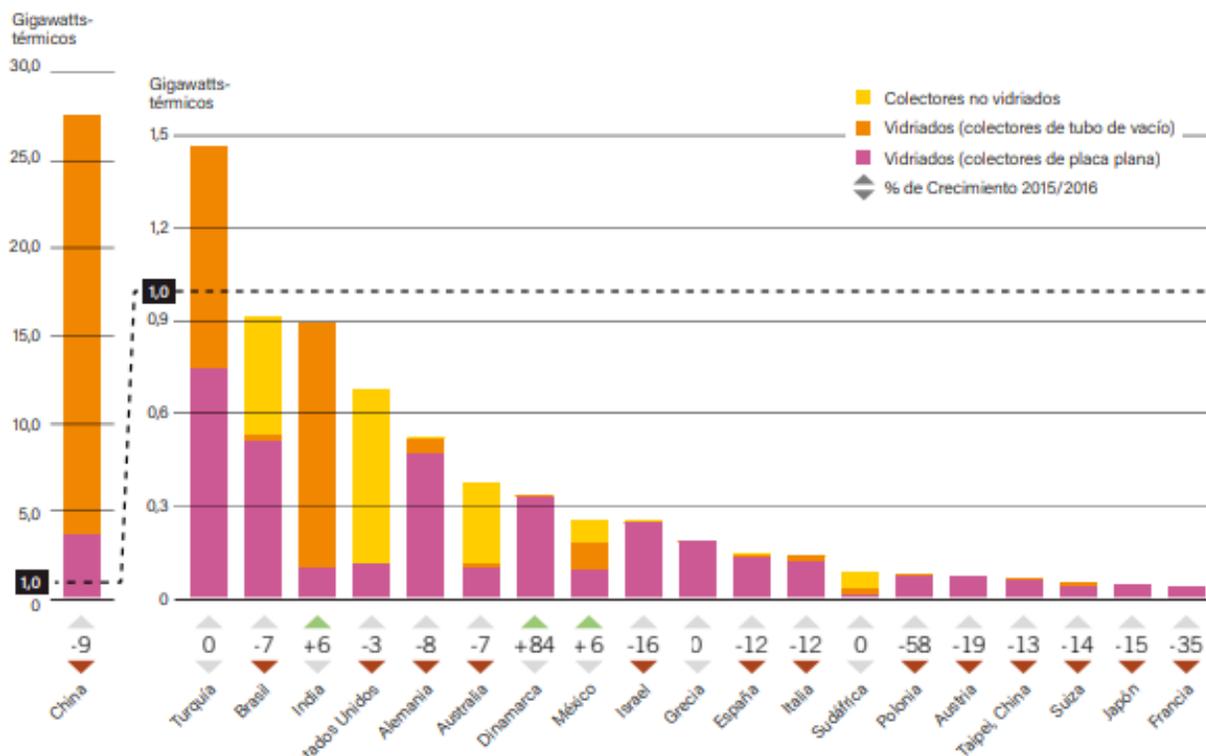


Gráfica 1.2. Capacidad global de colectores solares de calentamiento de agua

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

La tecnología térmica solar se utiliza ampliamente en todas las regiones del mundo para proporcionar agua caliente, calentar y enfriar el espacio, y para proporcionar calor, vapor o refrigeración para usos industriales. Procesos o cocción comercial. A finales de 2016, solar. Las tecnologías de calefacción y refrigeración se habían vendido en al menos 127 países.

La capacidad acumulada de esmaltado (placa plana y Tecnología de tubo de vacío) y colectores sin esmaltar en operación aumentó a un total de fin de año de 456 GWth, en comparación con 435 GWth al año anterior (Gráfica 1.2). Al igual que en 2015, los cinco primeros países en capacidad acumulativa fueron China, Estados Unidos, Turquía, Alemania y Brasil (Gráfica 1.3). Colectores solares térmicos de todos los tipos previstos. Aproximadamente 375 TWh (1,350 PJ) de calor por año al final de 2016, equivalente al contenido energético de 221 millones de barriles de petróleo. Sin embargo debido a los bajos precios de los combustibles fósiles durante todo el año, las instalaciones de sistemas solares térmicos volvieron a declinar en 2016. El crecimiento se registró en Dinamarca (84%), México e India (ambos 6%)⁽⁴⁾.



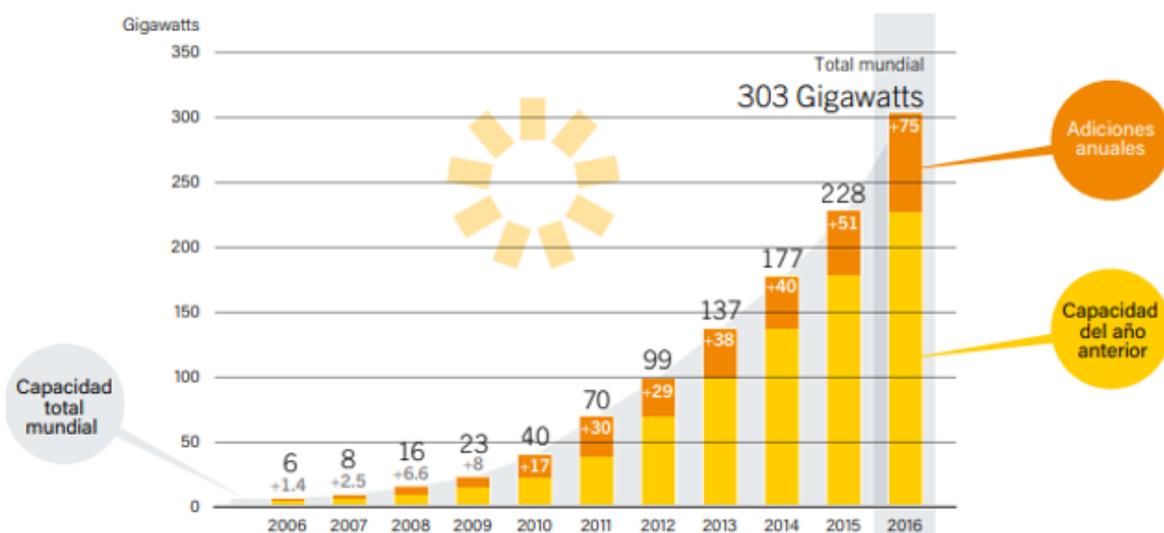
Gráfica 1.3. Adiciones de colectores solares para calentamiento de agua, 20 países líderes por capacidad añadida, 2016

Desarrollo de una pintura absorbtiva-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

1.3.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar se puede transformar directamente en electricidad mediante células fotovoltaicas. Este proceso se basa en la aplicación del efecto fotovoltaico, que se produce al incidir la luz sobre unos materiales denominados semiconductores; de esta manera se genera un flujo de electrones en el interior del material que puede ser aprovechado para obtener energía eléctrica. Un panel fotovoltaico, también denominado módulo fotovoltaico, está constituido por varias células fotovoltaicas conectadas entre sí y alojadas en un mismo marco. Las células fotovoltaicas se conectan en serie, en paralelo o en serie-paralelo, en función de los valores de tensión e intensidad deseados, formando los módulos fotovoltaicos.

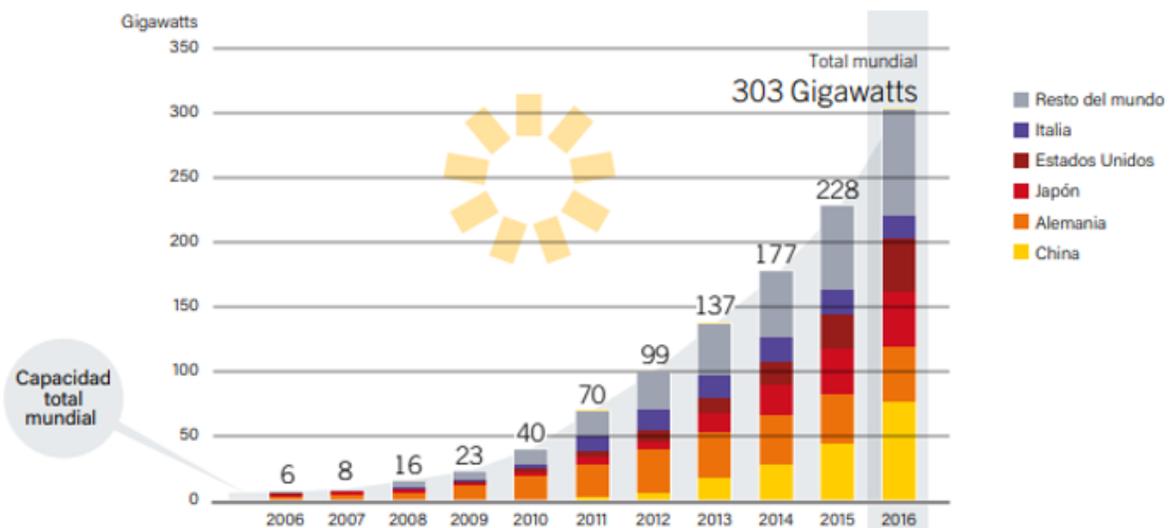
Desde el 2010, en el mundo se ha adicionado más capacidad en energía FV que en las cuatro décadas anteriores. Los nuevos sistemas fueron instalados en 2013 a un ritmo de 100 MW de capacidad por día. A inicios del año 2014 la capacidad global superó los 150 GW. Durante el 2016 se agregaron 75GW (Gráfica 1.4) de capacidad solar fotovoltaica a nivel mundial, lo cual equivale a la instalación de más de 31,000 paneles solares por hora ⁽⁶⁾.



Gráfica 1.4. Capacidad mundial de energía solar FV y adiciones anuales 2006-2016

Las cifras más recientes presentadas en el 2017, muestran que el 85% de la capacidad instalada estuvo focalizada en 5 mercados: China, Estados Unidos, Japón, India y el Reino Unido (Gráfica 1.5). Los líderes en capacidad solar FV por habitante son Alemania, Japón, Italia, Bélgica y Australia. Casi 11 GW de capacidad FV estaban conectados a la red en Europa en 2013, en comparación con 17.7 GW en 2012 y más de 22.4 GW en 2011. En América Latina, en el año 2014, entraron

en funcionamiento 625 MW de energía FV, frente a los 133 MW instalados en el 2013. El principal artífice de este incremento fue Chile aportando en un 75% del incremento total, seguido de forma distante por México y Brasil. México adicionó 150 MW para un total instalado de 0.3 GW. Se estima que la participación de la energía FV en la producción de la electricidad mundial alcance un 16% en 2050, lo cual representaría un aumento significativo de la meta del 11% en la hoja de ruta de 2010. La generación fotovoltaica contribuiría con un 17% de toda la electricidad limpia, y el 20% de toda la electricidad renovable. Se espera que China continúe liderando el mercado mundial, lo que representa alrededor del 37% de la capacidad mundial para el año 2050 ⁽⁵⁾.



Gráfica 1.5. Capacidad mundial de energía solar FV, por país y región 2006-2016

1.4 Energía eólica

El Sol calienta de forma desigual las diferentes zonas del planeta, provocando el movimiento del aire que rodea la Tierra y dando lugar al viento. El viento es, por tanto, energía en movimiento.

La energía eólica es la que contiene el viento en forma de energía cinética, esta energía se puede transformar en otro tipo de energía como la mecánica, eléctrica, hidráulica, etc. Una de las formas más utilizadas en la actualidad para el aprovechamiento a gran escala de la energía eólica es a través de las denominadas aeroturbinas ⁽⁶⁾.

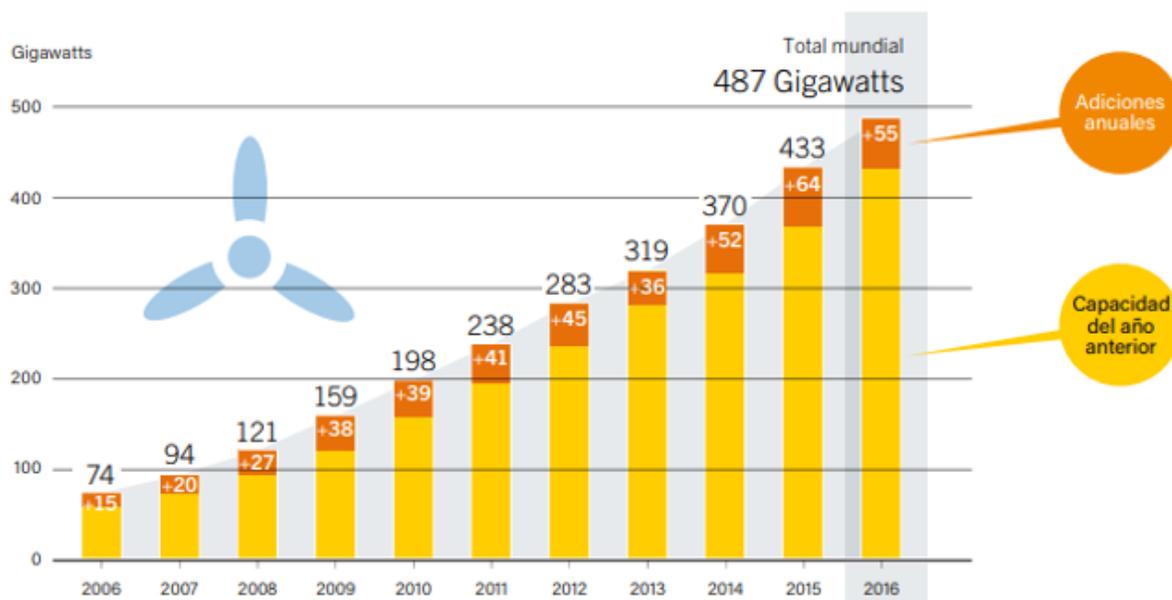
Estas pueden transformar la energía eólica en:

- Energía mecánica: aeromotores.
- Energía eléctrica: aerogeneradores.

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

Los aeromotores se han utilizado desde hace siglos para la molienda de grano, el bombeo de agua, etc. Actualmente siguen utilizándose en menor proporción para estos usos, además de incorporarse también en sistemas de desalación de agua. Los aerogeneradores son los sistemas de aprovechamiento eólico más utilizados hoy en día, observándose un crecimiento muy pronunciado en su utilización a partir del año 1990. Su funcionamiento se basa en que al incidir el viento sobre sus palas se produce un trabajo mecánico de rotación que mueve un generador que produce electricidad.

La capacidad eólica en todo el mundo llegó a 336,327 MW a finales de junio de 2014, de los cuales 17,613 MW se añadieron en los primeros seis meses del año. Este aumento es sustancialmente mayor que en el primer semestre de 2013 y 2012, cuando 13.9 GW y 16.4 GW se añadieron respectivamente. La capacidad eólica instalada en todo el mundo a mediados de 2014 fue de alrededor del 4% de la demanda mundial de electricidad. A junio de 2016, la capacidad eólica mundial alcanzó los 487 GW (Gráfica 1.6) ; con un liderazgo de países como Alemania, India y Brasil ⁽⁵⁾.

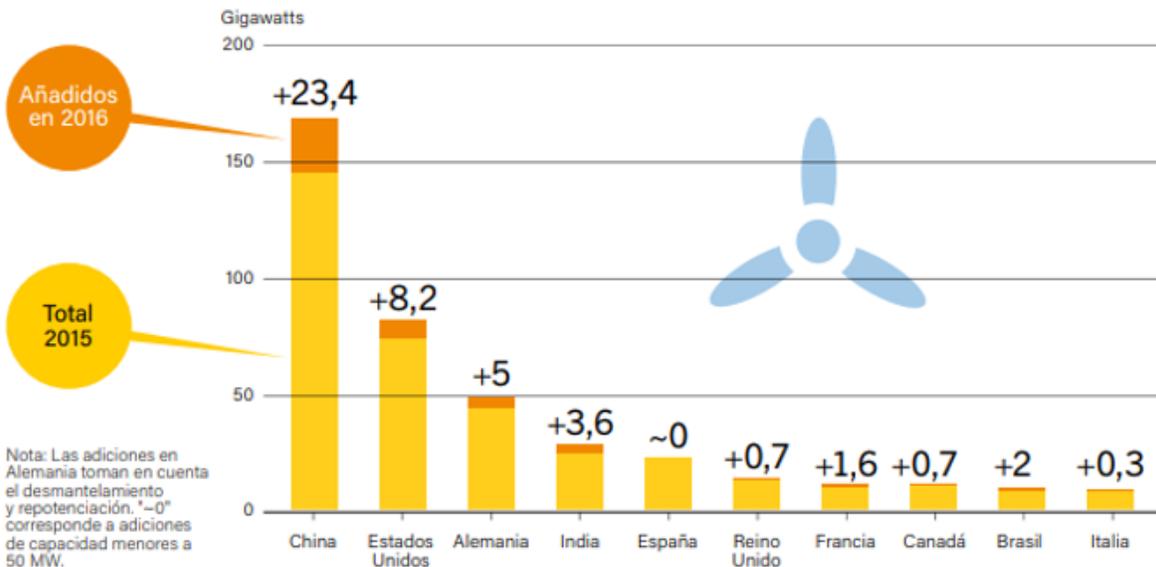


Gráfica 1.6. Capacidad mundial de energía eólica y adiciones anuales 2006-2016

Las razones para el desarrollo relativamente positivo de los mercados eólicos en todo el mundo, se centran en las ventajas económicas de la energía eólica y su creciente competitividad en relación con otras fuentes de electricidad, así como la urgente necesidad de poner en práctica tecnologías libre de emisiones con el fin de mitigar el cambio climático y la contaminación del aire. Los cinco países líderes en energía eólica son China, Estados Unidos, Alemania, India y España, los cuales

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

aportan un 67% de la capacidad eólica mundial. En total, cuatro países instalaron capacidades mayores a 1 GW en el primer semestre de 2016 (Gráfica 1.7): China con 10 GW, India 2.4 GW, Alemania 2.4 GW y Brasil 1.1 GW. India mantiene su posición como número dos en Asia y número cuatro a nivel mundial. Estados Unidos, después de que su efectividad colapsara en 2013, ha presentado signos de recuperación con un mercado de 835 MW superando por poco a países como Canadá (723 MW), Australia (699 MW) y Reino Unido (649 MW).



Gráfica 1.7. Capacidad de energía eólica y adiciones, 10 países, 2016

1.5 Energía geotérmica

La energía geotérmica procede de la diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre y la de su interior, que va desde una media de 15 °C en la superficie a los 6000 °C que tiene el núcleo interno. Esta diferencia de temperatura provoca un flujo continuo de calor desde el interior de la Tierra hacia la superficie. La temperatura de la Tierra suele aumentar unos 3 °C cada 100 metros; aunque en algunas zonas de la corteza existen anomalías geotérmicas que hacen que la temperatura aumente entre 100 °C y 200 °C por kilómetro, estas zonas son las que mejor se pueden aprovechar desde el punto de vista geotérmico. Las profundidades a las que se suelen situar estas explotaciones geotérmicas están entre 300 y 2000 metros.

La energía geotérmica se puede aprovechar en la actualidad de dos formas: directamente, como calor, o para la producción de electricidad.

Para producir electricidad se aprovecha la salida del vapor de las fuentes geotérmicas, que accionan turbinas que ponen en marcha generadores eléctricos. Para ello es necesario que la temperatura del agua subterránea sea superior a

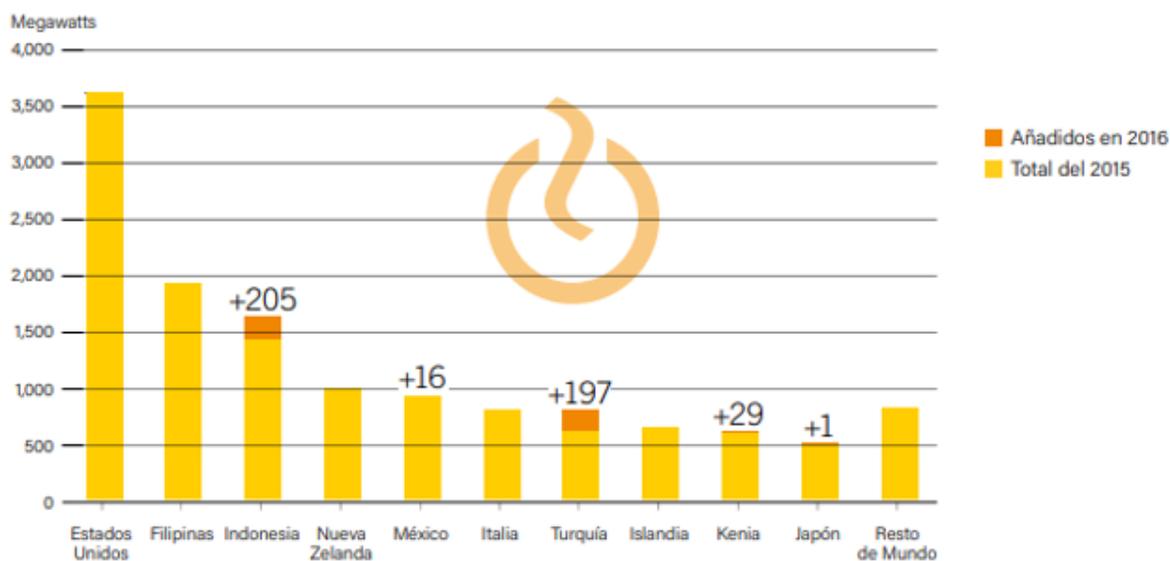
Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

150 °C. Una de las grandes ventajas de la producción de electricidad con energía geotérmica es que no es intermitente, como ocurre con la gran mayoría de las renovables, sino que la producción es constante y previsible.

La producción de calor a partir de energía geotérmica se puede obtener de dos formas distintas ⁽⁴⁾:

- Aplicaciones de baja y media temperatura: aprovechan directamente el agua subterránea, que ha de estar entre 30 °C y 150 °C.
- Aplicaciones de muy baja temperatura: utilizan una bomba de calor geotérmica (pueden aprovechar aguas de 15 °C).

A nivel mundial la producción global de este tipo de energía fue de 147 TWh con corte a 2016, de los cuales se estima que la mitad está dedicada para la generación de electricidad geotérmica. Aproximadamente 640 MW de la nueva generación de potencia geotérmica fue implementada en el 2016 para cerrar una capacidad mundial cercana a los 12.8 GW.



Gráfica 1.8. Capacidad de energía geotérmica y adiciones, 10 países líderes, 2016

Los países que más evolucionaron en capacidad instalada fueron Kenia, Turquía, Indonesia, Filipinas, Italia, Alemania, Estados Unidos y Japón (Gráfica 1.8). El uso directo geotérmico se refiere a la extracción térmica directa para calefacción y enfriamiento, excluyendo las bombas calor.

1.7 Energía biomásica

La energía del Sol es utilizada por las plantas para sintetizar la materia orgánica mediante el proceso de fotosíntesis. Esta materia orgánica puede ser incorporada y transformada por los animales y por el hombre. El término biomasa abarca un conjunto muy heterogéneo y variado de materia orgánica y se emplea para denominar a una fuente de energía basada en la transformación de la materia orgánica utilizando, normalmente, un proceso de combustión.

Las fuentes de biomasa que se utilizan para la obtención de energía son: ⁽⁵⁾

- Biomasa natural: Fundamentalmente la leña procedente de árboles que crecen de forma espontánea (sin ser cultivados), la cual ha sido tradicionalmente utilizada por el hombre para calentarse y cocinar. La biomasa natural constituye la base del consumo energético de muchos países en vías de desarrollo, pero su sobreexplotación está ocasionando el aumento de la desertización.
- Biomasa residual: Se produce en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas; también se generan residuos orgánicos en la industria y en núcleos urbanos, denominados en este último caso RSU (Residuos Sólidos Urbanos). Además de producir electricidad, que puede hacer que las instalaciones sean autosuficientes aprovechando sus propios recursos (como, por ejemplo, en granjas, serrerías, industrias papeleras o depuradoras urbanas), generan un beneficio adicional, a veces más valorado que la propia generación de electricidad, que es el evitar la degradación del medioambiente eliminando estos residuos.

Durante 2017, varios países implementaron políticas de apoyo a la producción y uso de bioenergía. Por ejemplo, en Brasil, se espera que la iniciativa RenovaBio lidere a un aumento significativo en la producción y uso de bioenergía.

En 2017, la India lanzó una importante iniciativa para mejorar el nivel de producción doméstica y uso de biocombustibles (incluidos los biocombustibles producidos a partir de residuos agrícolas). En contraste, el debate ha continuado dentro de la Unión Europea (UE) sobre el papel de bioenergía en la Directiva de la UE sobre energías renovables, con limitaciones para ser introducido en biocombustibles basados en alimentos.

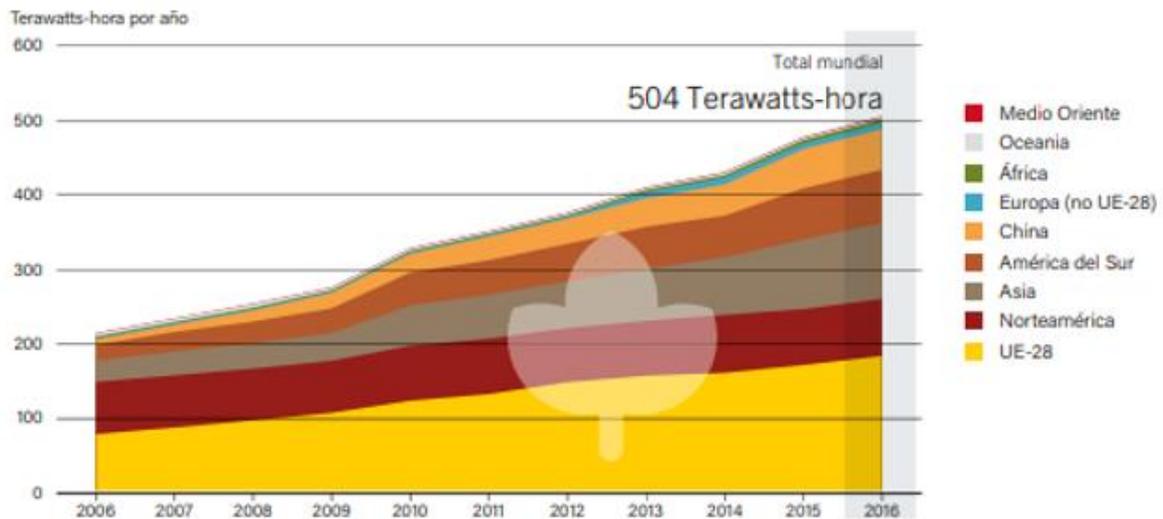
Alemania es el mayor consumidor (0,52 EJ) de biocalor en la UE, seguido de Francia (0.45 EJ), Suecia (0.36 EJ), Italia (0.32 EJ) y Finlandia (0.30 EJ) (Gráfica 1.9).

China utilizó unos 8 millones de toneladas de biomasa (equivalente a 120 petajoules (PJ)) en el sector industrial en 2016 (últimos datos disponible), y el decimotercer

plan quinquenal del país indica que esto aumentará a 30 millones de toneladas (450 PJ) para 2020.

El uso moderno del biocalor en edificios se concentra en el norte. América y la UE. El mercado de pellets de madera para uso doméstico y la calefacción comercial se mantuvo esencialmente sin cambios en 2017 en 14,0 millones de toneladas.

La mayoría de los pellets se utilizaron en Europa (11.1 millones de toneladas) con los principales mercados en Italia, Alemania y Francia, seguidos de América del Norte.



Gráfica 1.9. Generación mundial con bioenergía, por región, 2006-2016

1.8 Energía mareomotriz

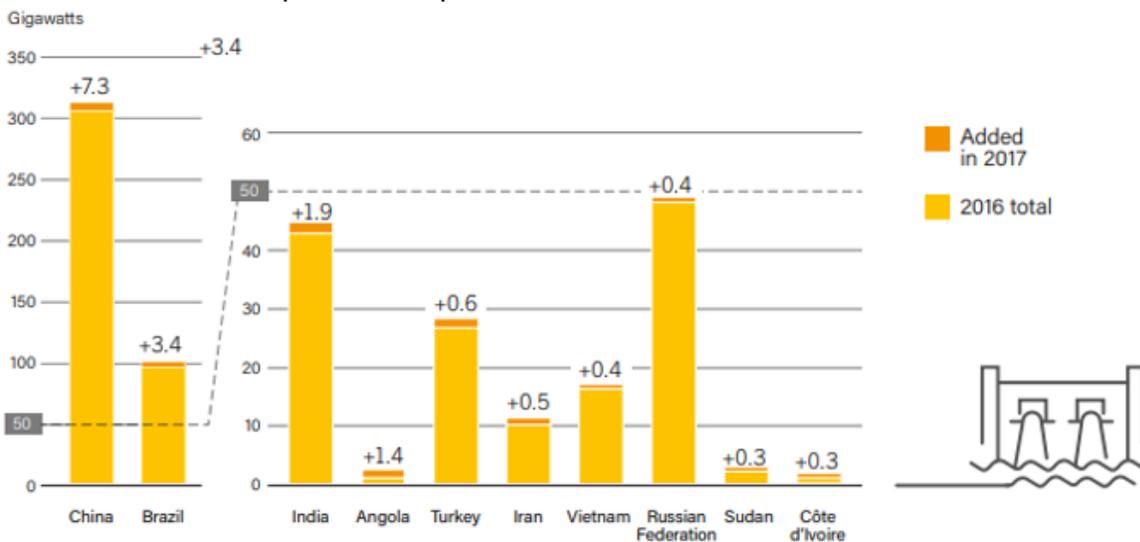
Las mareas son debidas a las acciones gravitatorias de la Luna y el Sol. La energía mareomotriz utiliza la diferencia entre las mareas para generar electricidad. Para un aprovechamiento rentable es necesario que la diferencia entre marea alta y baja sea, al menos, de 5 metros. Se estima que, en todo el planeta, sólo se localizarían 40 ubicaciones para su explotación rentable, con un potencial total de unos 15 000 MW (algo menos del 0,01% del consumo mundial de electricidad). El principio de funcionamiento más extendido se basa en construir diques capaces de contener un gran volumen de agua, donde se instalan unas compuertas que retengan el agua durante la subida de la marea. Una vez que la marea baja, las compuertas se abren dando pasó a un salto de agua que hace girar una turbina que, a su vez, pone en marcha un generador eléctrico ⁽⁶⁾.

1.9 Energía de las olas

El viento soplando sobre la superficie del mar puede producir olas de más de 20 metros de altura. El oleaje es otra fuente de energía renovable que alberga un gran potencial generador de energía. La energía cinética contenida en el movimiento de las olas puede transformarse en electricidad de distintas formas. El Consejo Mundial de la Energía (WEC) ha estimado la potencia mundial de este recurso en unos 2000 GW. La mayor parte de esta energía se concentra en los océanos Atlántico y Pacífico ⁽⁵⁾.

1.10 Energía hidráulica

El Sol evapora el agua de los océanos, mares, lagos y ríos, formando nubes; cuando éstas se enfrían, se condensan formando la lluvia y la nieve que se vierte sobre la tierra, reaprovisionándola y cerrando el ciclo. En la actualidad, la energía hidráulica se utiliza fundamentalmente para producir electricidad en las denominadas centrales hidroeléctricas. El agua, retenida en un embalse o presa, se deja caer por una tubería, a cuya salida se coloca una turbina, el eje de la cual comienza a girar al caer al agua; este giro pone en marcha el generador eléctrico obteniéndose así la electricidad. Una de las grandes ventajas de la producción de electricidad con energía hidráulica es que puede ser constante y previsible, al contrario que la gran mayoría de las renovables y, por lo tanto, se puede utilizar para satisfacer la demanda eléctrica base. Las centrales hidroeléctricas se pueden situar junto al cauce de un río o al pie de una presa ⁽⁴⁾.



Gráfica 1.10. Capacidad de energía hidroeléctrica y adiciones, los 10 principales países en capacidad agregada 2017

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

China siguió siendo el líder en la capacidad hidroeléctrica, que representa casi el 40% de las nuevas instalaciones en 2017 (Gráfica 1.10), y fue seguido por Brasil, India, Angola y Pavo. Otros países que agregaron capacidad significativa incluyen Irán, Vietnam, la Federación de Rusia y Sudán.

Brasil sigue siendo el mayor productor de energía hidroeléctrica en el sur América y ocupa el segundo lugar a nivel mundial para nuevas instalaciones en 2017.

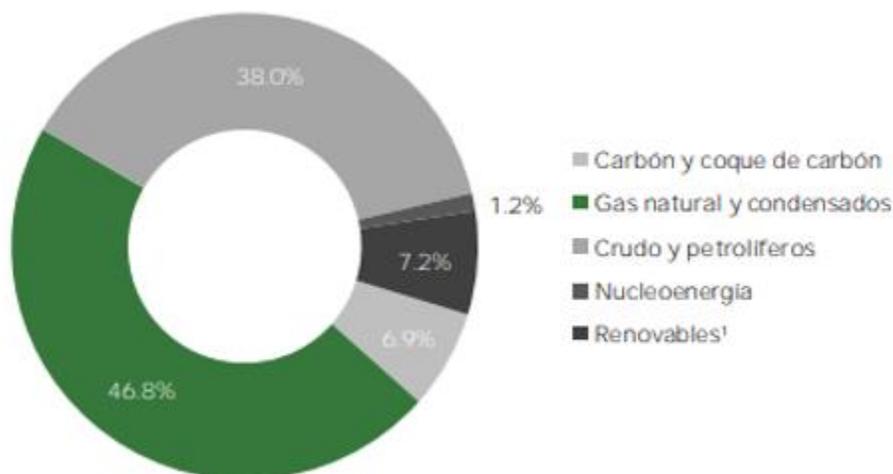
Se agregaron aproximadamente 3,4 GW para un total de fin de año de 100.3 GW

1.11 Energías Renovables en México

El principal objetivo de la Reforma Energética de México fue abrir y modernizar dos sectores: el de los hidrocarburos y el de la electricidad.

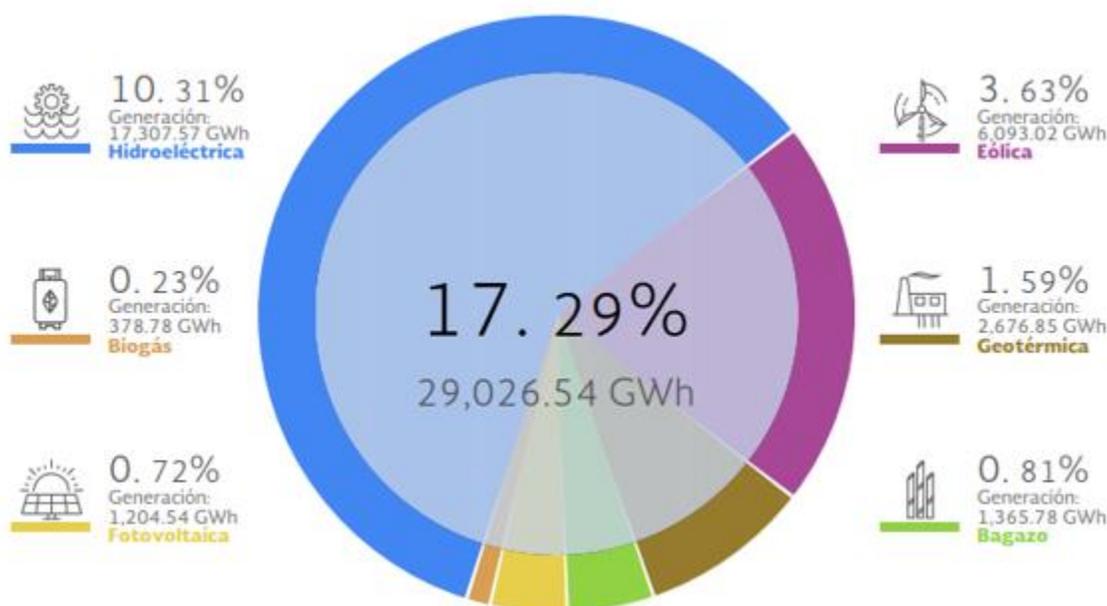
Los cuales eran monopolios constitucionales y que estaban cerrados en gran medida a la inversión y la innovación del sector privado.

La Reforma implica una reducción progresiva de las emisiones contaminantes del sector energético, que provienen en gran medida de los combustibles fósiles. Tras la aprobación de la Reforma Energética en 2013, México comenzó a diseñar instrumentos de planificación y mecanismos de promoción a través de leyes secundarias como la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Energía Geotérmica y la Ley de Transición Energética, que han hecho posible la puesta en marcha de políticas públicas y han supuesto un fuerte impulso para el uso de energías renovables. Hoy en día México tiene una Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, así como un Programa Especial de la Transición Energética, donde se han establecido hojas de ruta para alcanzar los objetivos fijados para 2018, 2021 y 2024 del 25%, 30% y 35% de energía limpia en la generación total de electricidad, respectivamente así como un objetivo a largo plazo de 50% de energía limpia en la generación de electricidad para 2050 ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.11. Oferta interna bruta por tipo de energético, 2017 (Petajoules)

Las energías renovables cerraron su participación con 663.62 PJ, cifra 1.5% por encima de los valores observados en 2016. Las fuentes renovables que incrementaron su participación en la oferta interna bruta de energía de 2017 fueron: solar (36.7%), biogás (18.5%), bagazo de caña (6.1%), hidroenergía (3.7%) y eólica (2.3%); mientras que la geoenergía y la leña disminuyeron 3.9% y 0.5%, respectivamente. La oferta interna bruta de nucleoenergía registró una participación de 1.2%, mostrando un aumento del 3.0% respecto a 2016.



Gráfica 1.12. Generación con energías renovables (GWh) del 1 de enero al 30 de junio de 2018

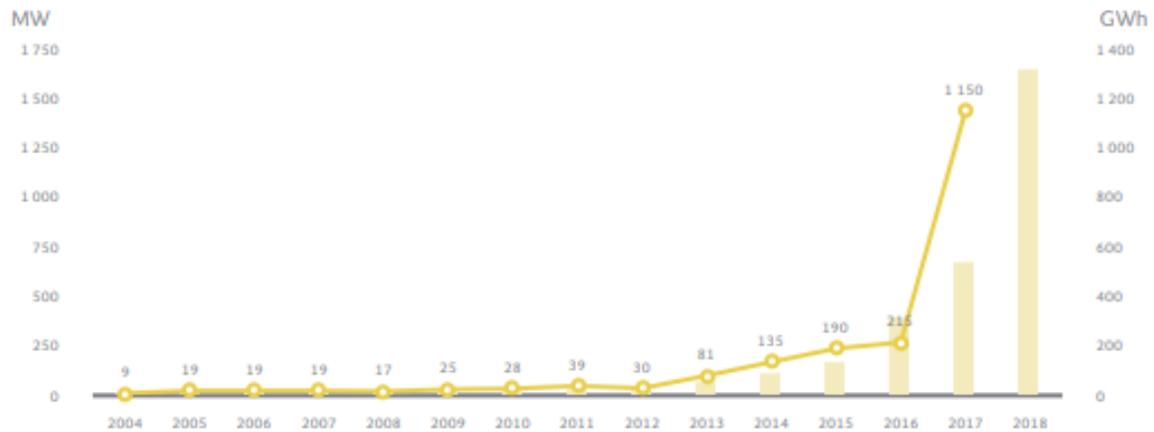
Durante el primer semestre de 2018 se generaron en el país 167,893.15 GWh de los cuales 24.12 % provinieron de fuentes limpias (40,499.01 GWh), con un incremento de 21.71 % respecto a la energía generada por estas fuentes durante el primer semestre de 2017.

1.11.1 Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica ha presentado un crecimiento exponencial, debido a que en los primeros seis meses de este año se instalaron cerca de 1,200 MW de capacidad resultado de la entrada en operación de las primeras fases de proyectos ganadores de las Subastas de Largo Plazo y proyectos legados; adicionalmente la generación distribuida ha venido creciendo de manera sostenida alcanzando ya 520 MW de capacidad instalada. Así, durante el primer semestre de 2018 se generó cinco veces

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

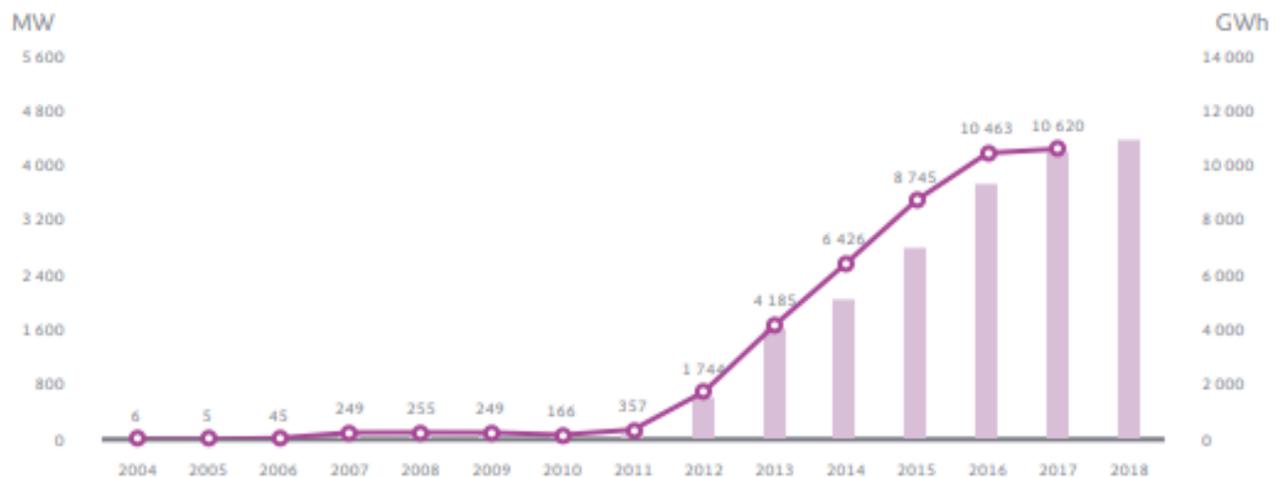
más energía (931.09 GWh) que durante el primer semestre de 2017 ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.13. Evolución histórica de la energía fotovoltaica en México 2004-2018

1.11.2 Energía eólica

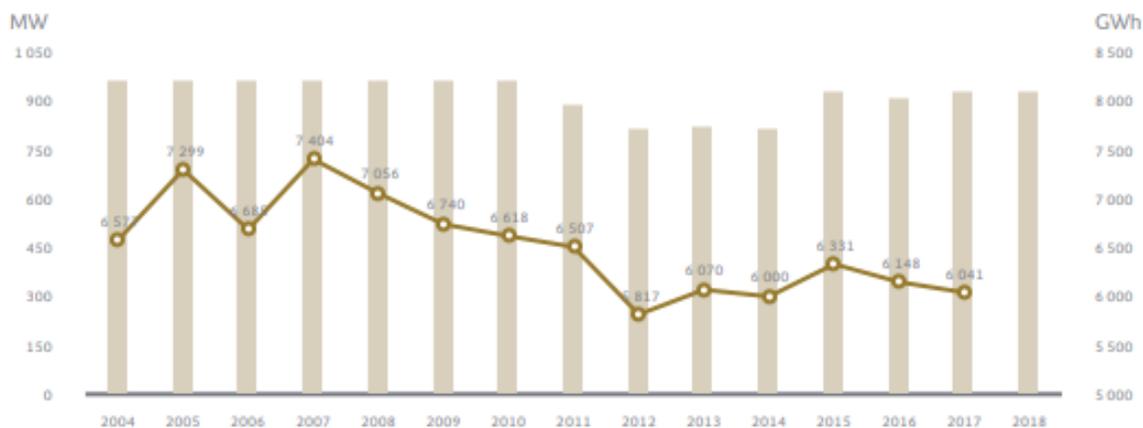
Al cierre del primer semestre de 2018 la capacidad instalada en parques eólicos alcanzó los 4,367.34 MW, 10.78 % más que al cierre del primer semestre de 2017, mostrando un crecimiento menor a la tendencia observada de 2011 a 2016. En los últimos seis años se construyó el 98 % de la capacidad instalada del país, representando ya el 5.74 % de la capacidad total de México y posicionándose como la segunda tecnología limpia más importante. La generación alcanzada en el primer semestre de este año fue 19.60 % mayor a la generada en el mismo periodo del 2017, debido a la entrada en operación de las primeras fases de dos proyectos ganadores de las Subastas de Largo Plazo ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.14. Evolución histórica de la energía eólica en México 2004-2018

1.11.3 Energía geotérmica

La energía geotérmica ha mantenido una capacidad constante a lo largo de los años, sin embargo la generación en 2018 fue 13.92 % menor a la del primer semestre de 2017 (2,698 GWh) debido principalmente a las tareas de mantenimiento de algunas unidades en el campo geotérmico de los azufres. Se espera que una vez concluidos estos trabajos la generación se incremente en el segundo semestre 2018 para regresar a niveles normales ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.15. Evolución histórica de la energía geotérmica en México 2004-2018

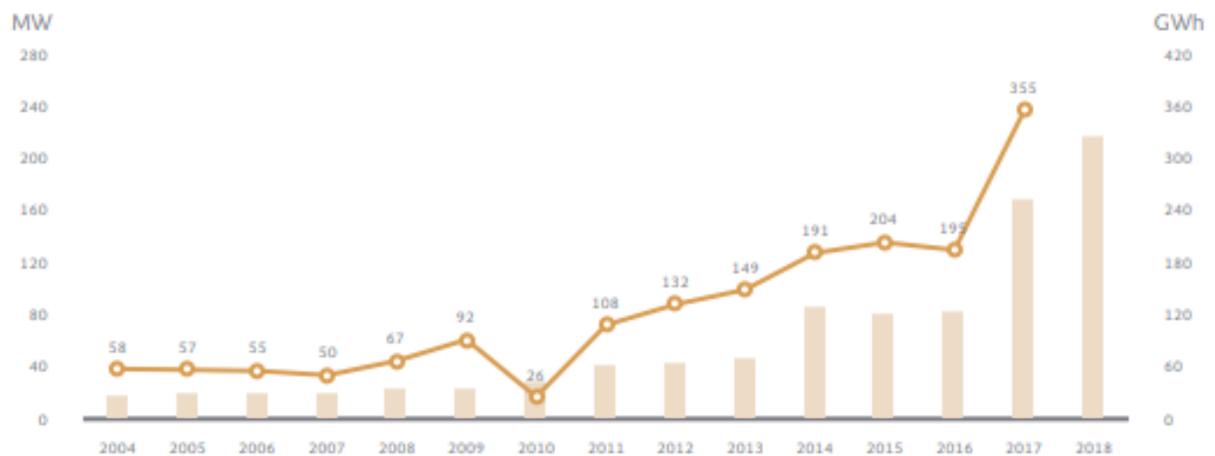
1.11.4 Energía biomásica

La generación de energía a partir de bagazo durante el primer semestre 2018 incrementó 13.69 % (164.44 GWh) con respecto al mismo periodo en 2017. Este crecimiento se debe a la entrada de dos nuevos ingenios generando electricidad para la red, con lo que se alcanzaron los 865.40 MW (1.14 % de la capacidad nacional) ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.16. Evolución histórica de la energía biomásica en México 2004-2018

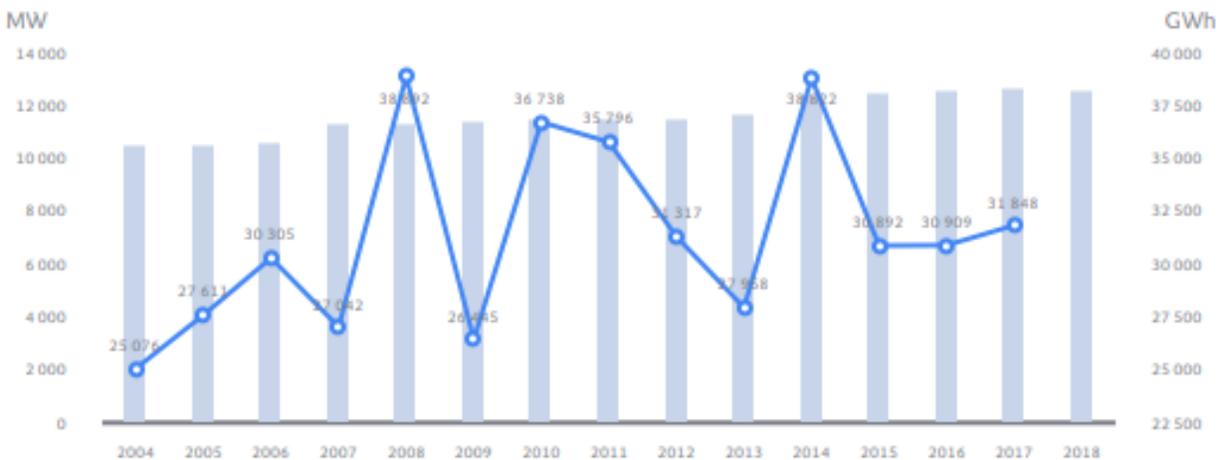
La energía generada por biogás ha mostrado un crecimiento importante desde 2016, triplicando la capacidad instalada entre junio de 2016 y junio 2018. Este crecimiento ha sido resultado de la instalación de proyectos de biodigestores en el sector agroalimentario y proyectos de generación de biogás por aprovechamiento de residuos sólidos urbanos. Como resultado, la generación se ha incrementado hasta 378.78 GWh (256.06 GWh más que los generados durante el primer semestre de 2017. No obstante la generación por biogás es aún muy reducida en México, si se toma en cuenta el potencial existente y las oportunidades para generación local, reduciendo problemas de gestión de residuos ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.17. Evolución histórica de la energía biomásica (biogás) en México 2004-2018

1.11.5 Energía hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica, presentó un incremento del 15.44 % (2,315.43 GWh) durante el primer semestre de 2018, este se debió a mayores precipitaciones. Esta tecnología es muy vulnerable al clima y hace patente la necesidad de buscar fuentes renovables alternativas con generación de base que permitan tener una mayor resiliencia energética y sirvan de soporte a las tecnologías variables ⁽⁷⁾.



Gráfica 1.18. Evolución histórica de la energía hidroeléctrica en México 2004-2018

An aerial photograph of a solar tower power plant. The central feature is a tall, white, cylindrical receiver tower. Surrounding it are thousands of heliostats (mirrors) that reflect sunlight onto the tower. The heliostats are arranged in a grid pattern, with some rows curving around the tower. The ground is a mix of brown and green, indicating a semi-arid environment. The text "Capítulo II" is overlaid in a large, black, serif font, and the subtitle "Colectores solares" is in a smaller, bold, italicized black font.

Capítulo II

***“Colectores
solares”***

2.1 La radiación solar y los colectores solares

La radiación solar tiene su origen en el Sol, una de las más de 135.000 millones de estrellas de la Vía Láctea. El Sol es un inmenso reactor de fusión termonuclear que quema cada segundo 600.000.000 toneladas de hidrógeno a 20 millones de grados Kelvin, irradiando una cantidad de energía equivalente a $3,7 \times 10^{23}$ kW, lo que representa 64.070 kW por m² de superficie solar ⁽²⁾.

Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía interna del medio de transporte. El componente principal de cualquier sistema solar es el colector solar. Este es un dispositivo que absorbe la radiación solar entrante, la convierte en calor y la transfiere al calentar a un fluido (generalmente aire, agua o aceite) que fluye a través del colector. La energía solar captada es transportada desde el fluido en circulación ya sea directamente al agua caliente o al equipo de acondicionamiento del espacio o a un tanque de almacenamiento de energía térmica, del cual se puede extraer para usarlo de noche o en días nublados ⁽¹⁴⁾.

2.2 Tipos de colectores solares

2.2.1 Colector de placa plana

Es un equipo que capta la radiación solar, la convierte en calor y transfiere éste a algún líquido o gas que fluye por el mismo.

Estos colectores se componen de cuatro elementos principales: la cubierta transparente, la placa absorbente, el aislante térmico y la carcasa ⁽⁸⁾.

Cubierta transparente: Produce el efecto invernadero y temperaturas más altas del absorbente; al reducir las pérdidas de calor por convección. Las características principales ópticas y térmicas de la cubierta de vidrio son:

- Alto coeficiente de transmitancia de la radiación solar (0.28-3.8 μ m).
- Bajo coeficiente de conductividad térmica o Bajo coeficiente de reflexión.

Los principales materiales utilizados son:

- Vidrio
- Materiales plásticos (policarbonato, poliuretano).

Placa absorbente: Su función es absorber la mayor cantidad de radiación solar y convertirla en energía térmica que se transferirá al fluido de trabajo o portador. La placa se debe cubrir con algún material que favorezca aún más la absorción de la radiación solar, siendo el más común la pintura color negro, aunque pueden utilizarse algunas a base de productos naturales.

Con respecto este tipo de colectores hay ciertas recomendaciones que deben tomarse en cuenta:

- Si el sistema va a funcionar por medio de termosifón, las caídas de presión no deben ser superiores a 3mm. de columna de agua por 1 m² de colector para que la circulación sea la adecuada y no se produzcan grandes saltos térmicos.
- No debe mezclarse el cobre y el acero, para evitar la corrosión de este último.
- Procurar que las pérdidas de presión en las entradas y salidas de fluido de la placa sean bajas y que las soldaduras no estén forzadas para impedir posibles fugas.
- Aislar bien las entradas y salidas para evitar pérdidas de calor debido a la creación de puentes térmicos entre la placa y los elementos no aislados.
- Debe diseñarse resistente a la temperatura y la presión

Aislante: su función es evitar las pérdidas de calor hacia el exterior, las principales características deben ser:

- Resistir altas temperaturas (hasta 150 °C) sin deteriorarse, esto puede lograrse colocando una capa reflectante entre la placa y el aislante con el fin de evitar que el aislante reciba directamente la radiación.
- Desprender la menor cantidad de vapores al descomponerse con el calor. En caso de ocurrir, no deben adherirse a la cubierta.
- Soportar la humedad que se produzca en el interior del calentador sin que se vean afectadas sus propiedades aislantes.

Los materiales más usados para aislar la placa son:

- ❖ Fibra de vidrio
- ❖ Espuma rígida de poliuretano
- ❖ Poliestireno expandido

Carcasa: Su función es proteger y soportar los elementos que conforman el colector solar, debe tener las siguientes características:

- Asegurar estabilidad al calentador, resistiendo la presión del viento.
- Ser resistente a la intemperie, a los efectos corrosivos de la atmósfera y a las inclemencias del tiempo.
- Su instalación debe hacerse de modo que se evite la acumulación de agua de hielo o nieve en el exterior del colector.
- Facilitar el desmontaje de la cubierta de vidrio para que el acceso a la placa captadora sea sencillo.
- Evitar la condensación del agua, esto puede hacerse por medio de dos técnicas:

- ❖ Vacío en el interior del colector cuando éste está frío, para que la carcasa no esté sometida a una presión muy alta cuando el aire en su interior se caliente.
- ❖ Practicar unos orificios en la carcasa para permitir la aireación del colector, así como la evacuación de la condensación. Los orificios se localizan en la parte posterior para evitar la entrada del agua de lluvia y la pérdida de aire caliente del interior del colector.

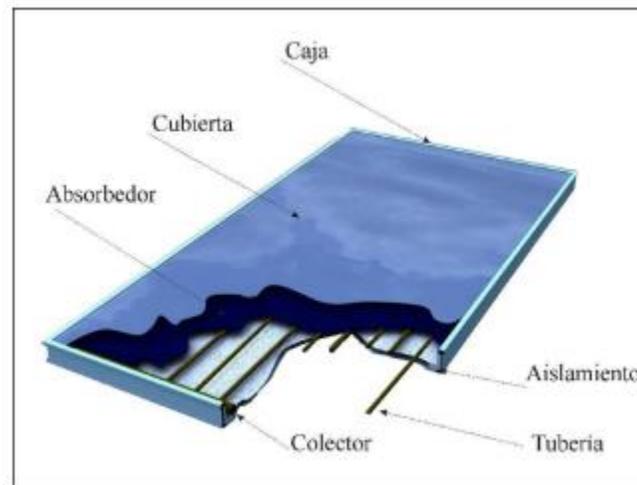


Imagen 2.1. Elementos que componen un colector solar de placa plana

2.2.2 Colectores solares sin cubierta

Este modelo es el más sencillo para transformar la energía solar en calor. No presentan caja y cubierta transparente que aisle al captador, su incremento de temperatura es bajo y no trabajan a temperaturas superiores a los 30°C, son recomendados para el calentamiento de piscinas ⁽⁹⁾.



Imagen 2.2. Colector solar sin cubierta

2.2.3 Colectores solares de aire

El funcionamiento es similar al de los colectores solares planos, con las únicas diferencias de que el fluido caloportador utilizado es el aire y se utilizan ventiladores para forzar la circulación. Este tipo de colector tiene un amplio rango de aplicaciones y tiene una buena capacidad de aprovechamiento de la energía solar, en este dispositivo el fluido que refrigera la placa captadora es el aire que se desea calentar ⁽⁹⁾.

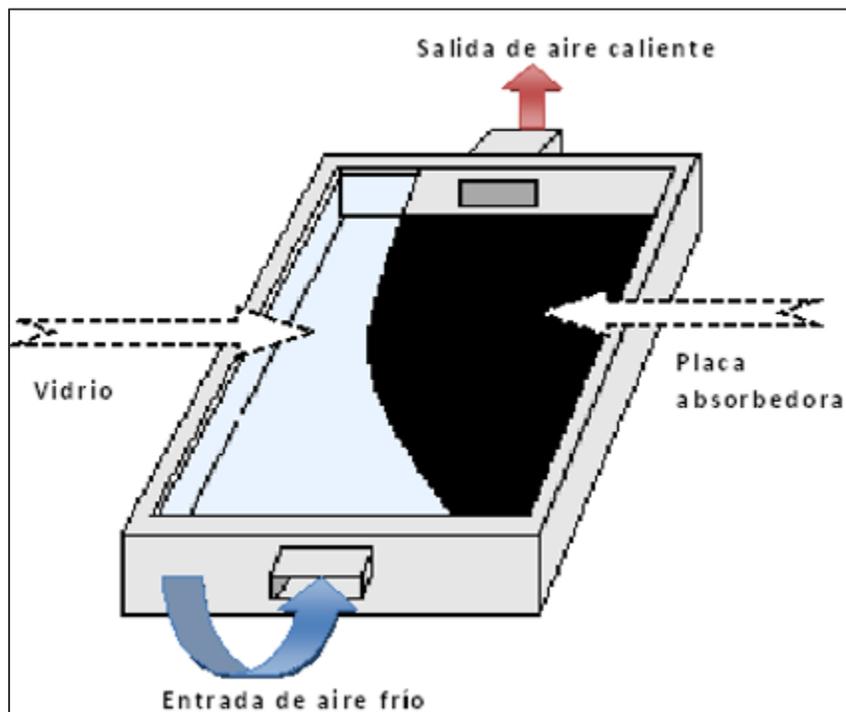


Imagen 2.3. Colector solar de aire

2.2.4 Colectores de tubo vacío

Como lo indica su nombre, están formados por hileras de tubos de cristal conectados en paralelo a una tubería de cabecera. En cada uno de estos tubos se ha realizado el vacío a fin de reducir al máximo las pérdidas de calor.

Su geometría tubular es necesaria para soportar la diferencia de presión entre la atmósfera y el vacío del interior. Los captadores de tubos de vacío se pueden clasificar en dos grandes grupos ⁽⁸⁾:

Tubos de flujo directo: Fue el primer sistema en desarrollarse es idéntico al de los captadores solares planos en donde el fluido caloportador circula por el tubo expuesto del sol, calentándose a lo largo del recorrido.

Tubos tipo heat pipe o flujo indirecto: Es una evolución del tubo de flujo directo que trata de eliminar el problema del sobrecalentamiento, presente en los climas calurosos. En este sistema se utiliza un fluido que se evapora al calentarse, ascendiendo hasta un intercambiador ubicado en el extremo superior del tubo. Una vez allí, se enfrían y vuelve a condensarse, transfiriendo el calor al fluido principal. Este sistema presenta una ventaja en los veranos de los climas cálidos, pues una vez evaporado todo el fluido del tubo, este absorbe mucho menos calor, por lo que es más difícil que los tubos se deterioren o estallen.



Imagen 2.4. Colector solar de tubo vacío

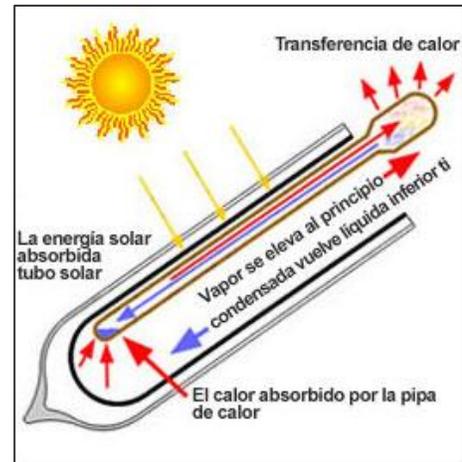


Imagen 2.5. Funcionamiento de un colector solar de tubo vacío

2.2.5 Colectores cónicos

Su principal característica es que constituyen simultáneamente la unidad de captación y de almacenamiento. Su superficie de captación es cónica o esférica con una cubierta de vidrio de la misma geometría. Con estas geometrías se consigue que la superficie iluminada a lo largo del día, en ausencia de sombra, sea constante. Su instalación es sencilla, pero presentan problemas de acumulación del agua y la superficie útil de captación es pequeña. Su aplicación principal es la producción de agua caliente sanitaria.

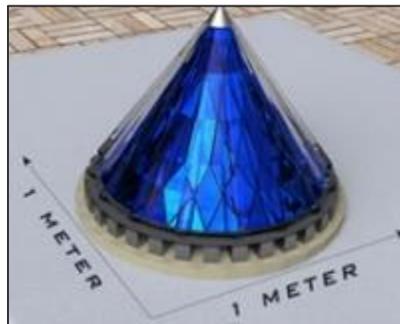


Imagen 2.6. Colector cónico

2.3. Pruebas a colectores solares

Los materiales utilizados para la construcción del colector deben ser capaces de resistir, además de los efectos creados debido al fluido circulante (corrosión, depósitos de escamas, etc.), los efectos adversos de rayos ultravioleta, la radiación, etc. El colector debe tener una vida útil de más de 20 años. Los colectores solares también deben soportar el funcionamiento térmico cíclico varias veces al día y las condiciones de funcionamiento extremas, como la congelación, el sobrecalentamiento, los choques térmicos, los impactos externos debidos a granizo o vandalismo y las fluctuaciones de la presión. La mayoría de estos factores ocurren simultáneamente. Por lo tanto, se requiere realizar pruebas en los colectores solares para determinar su calidad. En particular, la capacidad de un colector para resistir condiciones de operación extremas se examina como se especifica en la Norma Internacional ISO 9806-2: 1995 (1995a). Esta norma se aplica a todos los tipos de colectores solares, incluidos los sistemas de almacenamiento de colectores integrales, excepto los colectores concentradores de seguimiento. Los recolectores deben resistir una serie de influencias, que pueden identificarse y cuantificarse claramente, como las altas presiones internas de fluidos, las altas temperaturas y la penetración de la lluvia⁽¹⁰⁾.

Prueba de presión interna: El absorbente está sometido a pruebas para evaluar la medida en que puede soportar las presiones que pueda alcanzar en servicio. Para los absorbentes metálicos, la presión de prueba, mantenida durante 10 min, es la presión de prueba máxima especificada por el fabricante o 1.5 veces la presión de operación máxima del colector declarada por el fabricante, la que sea menor. Para absorbentes hechos de materiales orgánicos (plásticos o elastómeros), la temperatura de prueba es la temperatura máxima que alcanzará el absorbente en condiciones de estancamiento.

Esto se debe a que las propiedades de los materiales orgánicos dependen de la temperatura. La presión de prueba debe ser 1.5 veces la presión máxima de operación del colector especificada por el fabricante y debe mantenerse por lo menos durante 1 h. Para los colectores de calentamiento de aire, la presión de prueba es 1.2 veces la diferencia máxima de presión de operación del colector por encima o por debajo de la presión atmosférica, según lo especificado por el fabricante, mantenido durante 10 min⁽¹⁰⁾.

Prueba de exposición: La prueba de exposición proporciona una indicación de bajo costo de los efectos del envejecimiento que probablemente ocurran durante un período más largo de envejecimiento natural. Además, permite que el colector se "asiente", de modo que es más probable que las pruebas de calificación posteriores den resultados repetibles.

Un colector vacío se monta en el exterior y todos sus tubos de fluido están sellados para evitar el enfriamiento por la circulación natural del aire, excepto un tubo, que se deja abierto para permitir la expansión libre de aire en el absorbedor. Para cada clase de condiciones de referencia, el colector está expuesto hasta que hayan transcurrido al menos 30 días (que no es necesario que sean consecutivos) con la irradiación mínima⁽¹⁰⁾.

Prueba de resistencia a alta temperatura: Esta prueba pretende evaluar rápidamente si un colector puede soportar altos niveles de irradiancia sin fallas, como roturas de vidrios, colapso de la cubierta de plástico, fusión del absorbedor de plástico o depósitos significativos en la cubierta del colector desde el exterior⁽¹⁰⁾.

Gasificación del material colector: La prueba se realiza a una temperatura igual a la temperatura de estancamiento del colector. La prueba se realiza durante un mínimo de 1 h después de alcanzar un estado estable. Las condiciones requeridas en esta prueba son la adición de la velocidad del aire circundante, que debe ser inferior a 1 m / s⁽¹⁰⁾.

Prueba de choque térmico externo: Los colectores de vez en cuando pueden estar expuestos a tormentas repentinas en días soleados y calurosos, lo que provoca un choque térmico externo grave. Esta prueba tiene como objetivo evaluar la capacidad de un colector para resistir tales choques térmicos sin fallar. Aquí se utiliza un colector vacío, como en las pruebas previas preparadas de la misma manera. Un conjunto de chorros de agua está dispuesto para proporcionar una pulverización uniforme de agua sobre el colector.

El colector se mantiene en condiciones de funcionamiento en estado estable bajo un alto nivel de irradiación solar durante un período de 1 h antes de que se active la pulverización de agua. Luego se enfría con el rocío de agua durante 15 minutos antes de ser inspeccionado. El fluido de transferencia de calor debe tener una temperatura inferior a 25 ° C⁽¹⁰⁾.

Prueba de choque térmico interno: Los colectores de vez en cuando pueden estar expuestos a una ingesta repentina de líquido de transferencia de calor frío en días soleados y calurosos, lo que provoca un choque térmico interno grave. Esto podría

ocurrir, por ejemplo, después de un período de apagado, cuando la instalación vuelve a funcionar mientras el colector está en su temperatura de estancamiento. Esta prueba tiene como objetivo evaluar la capacidad de un colector para soportar tales choques térmicos sin fallas. Aquí nuevamente, se usa un colector vacío, como en las pruebas previas preparadas de la misma manera; Dependiendo del clima en el que operará el colector, y el fluido de transferencia de calor debe tener una temperatura inferior a 25 ° C ⁽¹⁰⁾.

Penetración de la lluvia: Esta prueba pretende evaluar hasta qué punto los colectores son sustancialmente resistentes a la penetración de la lluvia. Normalmente, los recolectores no deben permitir la entrada de lluvia o lluvia torrencial, ya sea a través de los sellos de acristalamiento o de los orificios de ventilación o de drenaje. Para esta prueba, las tuberías de fluido de entrada y salida del colector deben sellarse, y el colector debe colocarse en un banco de pruebas en el ángulo más bajo respecto a la horizontal recomendada por el fabricante. Si este ángulo no está especificado, entonces el colector se puede colocar a una inclinación de 45° respecto a la horizontal o menos.

Los colectores diseñados para integrarse en una estructura de techo deben montarse en un techo simulado y tener su parte inferior protegida. El colector debe rociarse en todos los lados con boquillas de rociado o duchas durante un período de prueba de 4 h. Para los colectores que pueden pesarse, el pesaje debe realizarse antes y después de la prueba. Después de la prueba, las superficies externas del colector deben limpiarse en seco antes del pesaje. Durante la limpieza, el transporte y la colocación en la máquina de pesaje, el ángulo de inclinación del colector no debe cambiarse apreciablemente. Para los colectores que no se pueden pesar, la penetración del agua en el colector solo se puede determinar mediante inspección visual ⁽¹⁰⁾.

Prueba de congelación: Esta prueba tiene como objetivo evaluar hasta qué punto los colectores de calentamiento de agua que se consideran resistentes a la congelación pueden soportar los ciclos de congelación y descongelación. Esta prueba no está diseñada para uso con recolectores que están llenos de líquidos anticongelantes. Se especifican dos procedimientos de prueba: uno para los colectores que se dice que son resistentes a la congelación cuando se llenan con agua y uno para los colectores que se dice que resisten la congelación después de

drenarlos. Para los colectores que se dice que pueden soportar la congelación, el colector se monta en una cámara fría.

El colector debe estar inclinado en el ángulo más bajo respecto a la horizontal recomendada por el fabricante. Si el fabricante no especifica ningún ángulo, entonces el colector debe estar inclinado en un ángulo de 30° respecto a la horizontal. Los colectores no esmaltados deben probarse en posición horizontal, a menos que el fabricante lo excluya. Para los colectores que se dice que resisten la congelación después de ser drenado (es decir, emplean un sistema de drenaje para protegerlos de la congelación), el colector se monta en una cámara fría como antes con las mismas disposiciones para la inclinación del colector ⁽¹⁰⁾.

Prueba de resistencia al impacto: Esta es una prueba opcional destinada a evaluar hasta qué punto un colector puede soportar los efectos de impactos fuertes, como los causados por vandalismo menor o que puedan ocurrir durante la instalación.

El colector se monta vertical u horizontalmente en un soporte rígido que debe tener una distorsión o desviación insignificante en el momento del impacto. Bolas de acero con una masa de 150 g se utilizan para simular el impacto pesado. Si el colector se monta horizontalmente, las bolas de acero se caen verticalmente; si está montado verticalmente, entonces los impactos se dirigen horizontalmente por medio de un péndulo.

El punto de impacto no debe estar a más de 5 cm del borde de la cubierta del colector y a no más de 10 cm de la esquina de la cubierta del colector, y debe moverse varios milímetros cada vez que se tira la bola de acero. Una bola de acero se debe colocar sobre el colector 10 veces desde la primera altura de prueba, luego 10 veces desde la segunda altura de prueba, y así sucesivamente hasta alcanzar la altura máxima de prueba.

La prueba se detiene cuando el colector muestra algún daño o ha sobrevivido al impacto de 10 bolas de acero a la altura máxima de la prueba. Las alturas de prueba comienzan desde 0,4 hasta 2,0 m en pasos de 20 cm ⁽¹⁰⁾.

Además de las pruebas de calidad anteriores, la ISO desarrolló una gama de estándares de prueba de calidad de materiales y productos para colectores solares. Se han desarrollado los siguientes estándares de métodos de prueba de material específico:

- ISO 9553: 1997. Métodos de energía solar para probar sellos de caucho preformados y compuestos de sellado utilizados en colectores.
- ISO 9808: 1990. Calentadores solares de agua y materiales elastoméricos para absorbentes, tuberías de conexión y accesorios. Métodos de evaluación.

- ISO / TR 10217: 1989. Energía solar: sistemas de calefacción por agua. Guía para la selección de materiales con respecto a la corrosión interna.

2.4 Concentradores solares

Para alcanzar temperaturas lo suficientemente altas que produzcan electricidad es imprescindible recurrir a un sistema de concentración de los rayos solares. Estos sistemas requieren de un dispositivo de seguimiento solar, de tal forma que siguen al Sol en su recorrido diario, consiguiendo así una mayor captación de la radiación solar.

Un concentrador solar es un tipo de colector solar capaz de concentrar la energía solar en un área reducida, aumentando la intensidad energética. Similar a una lupa enfocando su luz en un punto, los concentradores reflejan la luz solar por medio de un arreglo de espejos alineados hacia un objetivo capaz de captar dicha energía para su aprovechamiento ⁽¹¹⁾.

2.4.1 Concentradores cilíndrico parabólicos (Parabolic Trough Collector)

En estos sistemas los rayos solares se concentran mediante reflectores en forma de canal parabólicamente curvados hacia una tubería receptora que se ubica a lo largo de la línea focal de la superficie curvada. El mecanismo de seguimiento solar ideal asegura que el sol siempre se encuentre sobre la línea focal, a lo largo del día. Esta energía calienta al fluido de trabajo de alta eficiencia térmica que fluye a través de la tubería, y la energía calorífica es luego usada para generar vapor de agua.

El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los colectores cilíndricos parabólicos depende de la temperatura a la que se desea calentar.

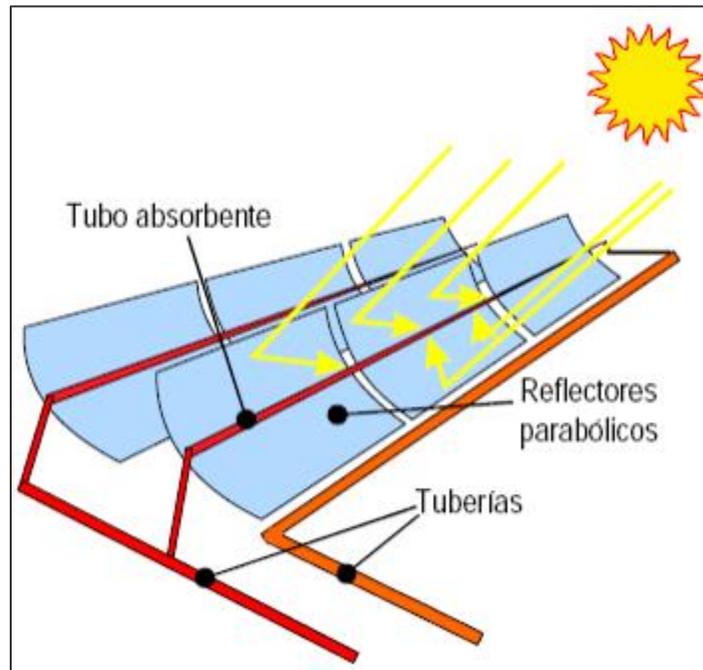


Imagen 2.7. Concentrador cilíndrico parabólico

Un campo colector (campo solar) consta de muchos concentradores (SCA; Solar Collector Assembly), cada uno compuesto de 10-12 módulos de captación solar (SCE; Solar Collector Element), con longitudes de 96-150 metros, en filas paralelas alineadas (lazos, loops), separadas 16-18 metros, de 600 hasta 1 200 metros de longitud, orientados de norte-sur y ocupando varias hectáreas de terreno. Esta configuración permite a los concentradores de un eje seguir al sol de este a oeste durante el día, para asegurarse que el sol este continuamente enfocado en las tuberías receptoras ⁽¹²⁾.



Imagen 2.8. Planta termosolar Solana Generating Station, de 280 MWe, desierto de Gila, Arizona, EUA [Abengoa, 2014]

Los ciclos combinados Integrados con campo solar (ISCC, Integrated Solar Combined Cycle), parecen ser los más eficientes, puesto que permiten aprovechar el calor de los gases exhaustos provenientes de la turbina de gas (a 600-700°C), para combinar este calor con el proveniente del campo solar y producir más vapor de agua para alimentar al ciclo de potencia. Se han instalado plantas de este tipo en Marruecos (ISCC Ain Beni Mathar, 20 MWe, 2010), Egipto (ISCC Kuraymat, 20 MWe, 2011), Algeria (ISCC Hasi R'mel, 25 MWe, 2011). Sudáfrica (Xina Solar One, en construcción) e Italia (Arquimede, 5 MWe, 2010). En México, se está construyendo una planta de Ciclo Combinado Integrado con Campo Solar, Agua Prieta II, con un campo de colectores parabólicos de 14 MWe.(Imagen 2.9).



Imagen 2.9. Planta de Ciclo Combinado Integrado con Campo Solar, Agua Prieta II, con un campo de colectores parabólicos de 14 MWe.

2.4.2 Concentradores de espejos lineales Fresnel (CLFR, Compact Linear Fresnel Reflectors)

Los sistemas térmicos solares de CLFR son una tecnología promisoría en aplicaciones solares térmicas. En los sistemas CLFR, usualmente de 8-16 tubos paralelos están localizados dentro de una cavidad trapezoidal, que recibe el flux solar reflejado por los espejos situados por debajo de esta (7-12 m).

El fluido, usualmente agua, que circula por dentro de los tubos cambia de fase (en un 75%) debido al flux solar incidente.

Cada espejo puede girar de forma autónoma pero sincronizada con todos los restantes, para reflejar los rayos solares al receptor situado en la parte superior, en donde se encuentran los tubos que transportan el fluido de trabajo. La pared externa de cada tubo está recubierta de un material absorbente, para alcanzar mayores temperaturas y retirar una mayor cantidad de calor útil. La parte superior de este receptor está cubierta con aislante térmico y una última parte metálica para protección contra los efectos ambientales. Por debajo del aislante y arriba de los tubos receptores se tiene una superficie cóncava o poligonal que refleja los rayos recibidos de los espejos de la parte inferior. En la parte inferior, para disminuir las pérdidas térmicas por convección, se coloca un cristal para producir el efecto invernadero.

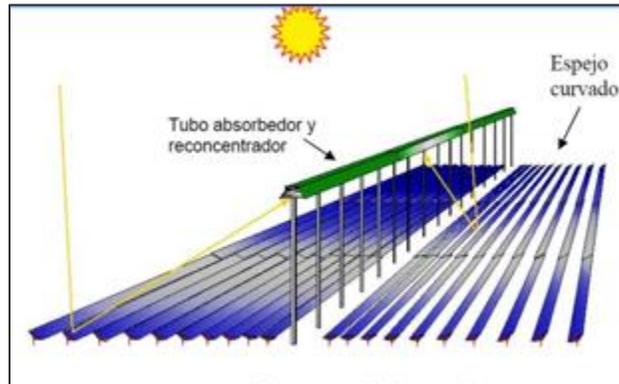


Imagen 2.10. Concentrador de espejos lineales Fresnel

Las plantas con esta tecnología solar instaladas en el mundo, por orden cronológico son:

Kimberlina Solar Power Thermal Plant (AREVA), Baksfield, California, EUA. Inicio operaciones en Octubre de 2008, 5 MWe (290°C, 40 bar), 25 988 m² de área de Campo Solar, 3 líneas de 385 m de longitud, 10 espejos de 2 m de anchura en cada línea, fabricante de espejos AUSRA.



Imagen 2.11. Reflector lineal Fresnel. [Areva solar, 2012]

Thermosolar Power Plant Puerto Errado 1, en Murcia, España. Inicio operaciones en Marzo 19 de 2009, 1.4 MWe (270°C, 55 bar), 2 líneas de 806 m de longitud, espejos de 16 m de anchura, fabricante de espejos Novatec Solar España S.L.



Imagen 2.12. Planta Termosolar de espejos lineales Fresnel, Thermosolar Power Plant Puerto Errado 2, Murcia, España, 2012

Thermosolar Power Plant Puerto Errado 2, en Murcia España. Inicio operaciones en Marzo 31 de 2012, 30 MWe (270°C, 55 bar), 302,000 m², (Imagen 2.12) de área de Campo Solar, 28 líneas de 940 m de longitud, espejos de 16 m de anchura. Fabricante de espejos Novatec Solar España S.L. (Nova-1), fluido de trabajo agua, producción anual Planeada 49,000 MWh. 0.5 horas de almacenamiento térmico.

Liddell Power Station, New South Wales, Australia. Inicio operaciones en Octubre de 2012, 9 MWe (270°C, 55 bar), 18 490 m² de área de Campo Solar, 4 líneas de 403 m de longitud, espejos de 16 m de anchura, fabricante de espejos Novatec Solar España S.L. (Nova-1), fluido de trabajo Agua/vapor, producción anual planeada 13 550 MWh.

Kogan Creek Solar Boost, en Australia, 44 MWe, 14 líneas de 500 m de longitud, espejos de 36 m de ancho, fabricados por Areva Solar (CLFR), opera a 370°C y 60 bar, condensador enfriado con aire, arranque en 2015.

La planta Dhursar, en Rajasthan, India, de 125 MWe, inició operaciones en noviembre de 2014. Es la más grande del mundo y la que tiene la tecnología de punta, construida por Areva Solar para Reliance Power. (Imagen 2.13)



Imagen 2.13. Planta Dhursar, en Rajasthan, India de 125 MWe, 2014

En Italia, la planta piloto Rende CSP Plant, de 1 MWe, con un campo solar de 9 780 m² y utilizando como fluido de trabajo Diathermic Oil, opera desde 2014.

En Francia las plantas termosolares: Alba Nova 1, de 12 MWe, con un campo solar de 140 000 m², 21 líneas de 750 metros de longitud y espejos de 12 metros de ancho y Llo Solar Thermal Project, de 9 MWe, con 120 000 m² de área de campo solar, 25 líneas de 340 metros de largo y espejos de 16 m de anchura y una hora de almacenamiento térmico, ambas arrancaron en 2015.

2.4.3 Concentradores con disco/motor

Un sistema disco/motor es una unidad puesta en solitario compuesta primariamente de un colector, un receptor y un motor. La energía del sol se colecta y se concentra en una superficie con forma de disco paraboloide a un receptor que absorbe la energía y la transfiere a un fluido de trabajo del motor Stirling. El motor convierte el calor a potencia mecánica en una manera similar a los motores convencionales o sea por compresión del fluido de trabajo cuando este está frío, calentando el fluido de trabajo comprimido, y luego expandiéndolo a través de una turbina o con un pistón para producir trabajo. La potencia mecánica es convertida a potencia eléctrica por un generador eléctrico o alternador ⁽⁸⁾.

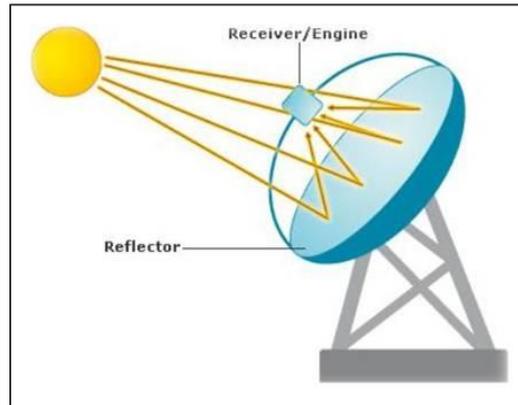


Imagen 2.14. Concentrador con Disco/Motor

solar es muy poca, siendo Estados Unidos de América en donde se encuentran las dos plantas más importantes: Maricopa Solar Project de, (Imagen 2.15). Inicia operaciones en Enero de 2010, 1.5 MWe, 60 discos, fabricante de discos Stirling Energy System (SES) modelo Suncatcher, cada disco produce 25 kWe. Tooele Depot es una planta de este tipo de 1 MWe, ubicada en un campo militar.



Imagen 2.15. Planta solar Maricopa Solar Project, 1.5 MWe, California, EUA

2.4.4 Sistemas de torres de potencia

Para entradas extremadamente altas de energía radiante se pueden utilizar una gran cantidad de espejos planos o helióstatos, para reflejar su radiación solar directa incidente en un objetivo. A este sistema se le llama Campo Heliostático o Colector de Receptor central.

Usando segmentos de espejo ligeramente cóncavos sobre los helióstatos, grandes cantidades de energía térmica pueden ser dirigidos al interior de la cavidad de un generador de vapor para producir vapor de alta presión y temperatura. La energía calorífica concentrada absorbida por el receptor es transferida a un fluido de trabajo y puede ser almacenada para su uso posterior en la producción de electricidad.

Los helióstatos colectan y concentran la luz solar sobre un receptor, que absorbe la luz del sol concentrada, transfiriendo esta energía a un fluido de transporte de calor o fluido de trabajo. El sistema de transporte de calor, que consiste de tubos, bombas y válvulas, conduce el fluido de trabajo en un circuito cerrado entre el receptor, el termostanque y el sistema de conversión de potencia.

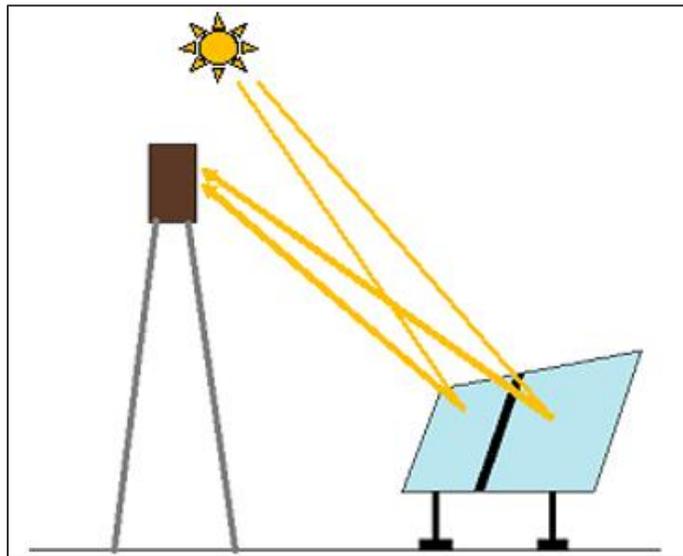


Imagen 2.16. Sistema de torres de potencia

Aunque los Estados Unidos de América desarrollaron torres experimentales para captar energía solar en el desierto de Mojave, fue casi tres décadas después que España instaló la Planta Solar 10 (PS10), la primera torre solar comercial en marzo de 2007, a 15 millas al oeste de Sevilla, en el sur de España Sanlúcar la Mayor.

En el año 2014, Los E U A añadieron a su capacidad instalada con tecnología de torre de potencia de 5 MWe, las plantas termosolares de torre central de Ivanpah Solar Electric Generation System de 392 MWe (Imagen 2.17) y Crescent Dunes

Solar Energy Project de 110 MWe. De modo que la capacidad total instalada en este país es de 507 MWe, que lo convierte en el líder mundial en esta tecnología; seguido por Marruecos, con la planta termosolar NOOR III de 150 MWe y España con 51 MWe. Estos tres países contribuyen con el 99.5 % de la capacidad mundial que utiliza esta tecnología, que es de 726 MWe.



Imagen 2.17: Planta solar Ivanpah Solar Electric System (ISEGS) en California, EUA.

La planta termosolar insignia de Solar Reserve, Crescent Dunes, ubicada en Nevada, cuenta con 10 horas de almacenamiento energético para carga completa (Imagen 2.18). Se trata de la primera instalación a escala de servicio público del mundo en incluir el almacenamiento energético avanzado en torre de potencia con sales fundidas. La capacidad de almacenamiento del proyecto de 1.1 GWh es casi 40 veces el tamaño del mayor proyecto de almacenamiento en baterías construido o en construcción al día de hoy. Esta planta suministra más de 500 000 MWh de electricidad al año, el doble de producción de un proyecto solar fotovoltaico de similar tamaño y sin almacenamiento. La tecnología de almacenamiento patentada por Solar Reserve y desarrollada en EUA considera una parte del costo del almacenamiento en baterías a escala de servicio público sin, prácticamente, degradaciones en el rendimiento producidas con el tiempo. Además, no es necesario sustituir las sales fundidas durante toda la vida útil de la planta, de más de 30 años ⁽¹³⁾.



Imagen 2.18. CSP Crescent Dunes, de 110MW, en Tonopah (Nevada)

Capítulo III



*“Construcción y
pruebas de un
solarímetro”*

3.1 Solarímetro

La cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período se denomina irradiación.

Se expresa en unidades de energía por unidad de área, Wh/m². La radiación solar en el suelo a veces se denomina insolación.

En el mercado existen diferentes modelos de equipos para determinar la radiación solar y que varían de costo desde algunos cientos hasta miles de dólares. A fin de contribuir a realizar una buena estimación de la radiación solar en un área de interés de una manera sencilla y económica. De esta manera, a través del solarímetro casero es posible estimar datos sobre radiación solar para una zona en particular.

La medición de la energía solar se realiza por medio de solarímetros. Los solarímetros están basados en el principio de absorción de la radiación solar por un cuerpo negro y en la conversión de esta radiación a otra forma de energía, la misma que es proporcional a la intensidad de la radiación.

Teóricamente, un cuerpo negro capta toda la radiación a la que está expuesta. Sin embargo, en la práctica sólo se cuentan con cuerpos opacos los cuales solamente son capaces de captar una parte de la radiación total. No obstante, a partir de consideraciones termodinámicas es posible emplear estos cuerpos opacos para estimar la radiación solar instantánea sobre una región determinada. De otra parte, la energía aprovechable de la radiación solar proviene de la región del espectro visible e infrarrojo cercano, que son las ondas electromagnéticas que producen el incremento de la energía interna del cuerpo ⁽¹⁴⁾.

3.2 Material absorbente

El material absorbente debe tener una absorción tan alta como sea posible para la radiación solar, y debe conducir el calor absorbido de manera eficiente en la transferencia de calor.

La importancia de la conductividad térmica del material absorbente depende en gran medida del diseño del colector, básicamente, determina su capacidad de absorber radiación (absorbancia) y su capacidad de emitir radiación cuando se calienta (emisividad).

En muchos colectores de placa plana, el fluido fluye a través de tubos que están unidos a una lámina absorbente. Dado que los tubos están separados a cierta distancia (del orden de 10 cm), es importante una buena conductividad en el material absorbente. Para este diseño, el cobre es el material preferido por su alta conductividad y resistencia a la corrosión. En los colectores típicos, la eficiencia de las aletas de la placa de cobre es del orden del 95% con respecto a una placa con

conductividad infinita. Como regla general, debe ser al menos 0.85, preferiblemente por encima de 0.90 el valor de absorbancia en el material.

La mayoría de los materiales absorbentes no tienen una absorbancia muy alta, y deben cubrirse con recubrimientos solares especiales.

Se pueden distinguir los tratamientos con pintura negra y los tratamientos selectivos. La pintura negra proporciona una elevada absorbancia (95 %) pero también una elevada emisividad (85–95 %) lo que produce muy buen rendimiento a temperaturas bajas. A altas temperaturas los rendimientos son bajos y las temperaturas máximas alcanzables no son muy elevadas. Normalmente se utilizan pinturas solares específicas que soportan las temperaturas de trabajo, con aglomerantes para que no se degraden y le proporcionen máxima durabilidad. Los tratamientos selectivos intentan, manteniendo un valor elevado de la absorbancia (95 %), reducir mucho la emisividad del absorbedor (5–15 %) ⁽¹⁰⁾.

Para una absorción solar dada, el rendimiento de un colector siempre mejora si se reduce la emisividad.

La elección óptima de un revestimiento absorbente depende no solo de la eficiencia del colector sino también del costo y la durabilidad. En general, las pinturas son más baratas y más fáciles de aplicar que los recubrimientos depositados por procesos químicos o eléctricos. Existen bastantes recubrimientos que pueden usarse hasta aproximadamente 200 ° C, pero a altas temperaturas, la durabilidad se convierte en un problema. Cuanto mayor sea la temperatura de funcionamiento, más difícil será lograr la selectividad. La degradación del material no solo se convierte en un problema más grave a altas temperaturas, sino que la emisividad aumenta con la temperatura.

Por tal motivo se desarrolló una pintura absortiva-radiativa a partir de un material que no se usa como recubrimiento en los colectores solares actualmente para conocer su comportamiento.

3.2.1 Análisis de escoria de aceración (Basic Oxygen Furnace BOF)

El Proceso BOF se originó en Austria en 1952, fue hecho para convertir arrabio con bajo contenido de fosforo (0.3%) se bautizó con las iniciales LD Lanza de Linz, Luego la técnica se extendió para arrabios de alto fósforo, mediante la adición al chorro de oxígeno de polvo de piedra caliza. Entonces se logró la producción de aceros con arrabio de contenidos con alto fósforo que llegan al 2% ⁽¹⁵⁾.

La escoria es una mezcla de óxidos que tuvo la misión, dentro del convertidor, de fijar los elementos indeseables. La escoria de acería, también llamada escoria LD o escoria BOF (Basic Oxygen Furnace) se produce en el convertidor: el arrabio procedente de los hornos altos se carga junto con la chatarra y otros aditivos en el convertidor de acero, oxidando el carbono, el silicio y el fósforo presentes mediante la inyección de oxígeno. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO_2) y el resto de impurezas en forma de escoria semipastosa que sobrenada por encima del acero. Debido a su menor peso específico que el metal, tiende a flotar y permanecer en la superficie del baño metálico. La escoria se compone de diversas sustancias, las que forman entre sí soluciones, estas sustancias pueden ser: óxidos, sulfuros, silicatos, fosfatos, aluminatos ⁽¹⁵⁾.

Cerca de 100 a 200 kilogramos de escoria del BOF se generan por tonelada de acero líquido. Este material es de uso frecuente en proyectos como la construcción de carreteras, pero esta ruta proporciona pocos aumentos de la eficiencia de la energía. El resultado es un aumento en la producción de la escoria del hasta 15% sin el aumento neto en emisiones de CO_2 .



Imagen 3.1. Escoria de aceración

La composición de la escoria tipo BOF que se utilizó en el trabajo:

COMPUESTO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
CaO	36.32	57.27	44.00
MgO	2.98	15.52	8.15
SiO₂	8.89	20.69	14.00
MnO	3.70	9.49	5.90
FeO	13.19	43.00	23.00
Pb			3.20
P			0.60
S			0.10
Al₂O₃	0.72	1.69	1.20

Tabla 3.1. Composición de la escoria tipo BOF

3.3 Construcción del solarímetro

Equipo y materiales

- Escoria de aceración (BOF)
- Molino de martillos
- Tamizador y tamices
- Adhesivo sintético comercial
- Tubo metálico de ½ pulgada
- Tubo de policarbonato de 2 pulgadas
- Brocha
- Termómetro de metal
- Taladro
- Silicón
- Corchos (Dos de ½ pulgas y Dos de 2 pulgadas)
- Limadura de cobre
- Base de madera

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

Antes de pasar al molino de martillos la escoria fue previamente lavada y limpiada, retirando los trozos de metal oxidados que tenía para no dañar el equipo, además de que fue secada antes de su molienda.

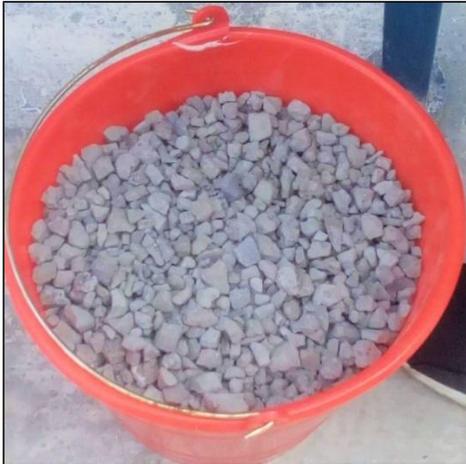


Imagen 3.2. Escoria tipo (BOF)



Imagen 3.3. Molino de martillos

Después de tener la escoria molida fue llevada para ser tamizada, se utilizaron mallas de 80, 100, 125, 200, 350, 500.



Imagen 3.4. Tamices con escoria de aceración



Imagen 3.5. Tapones de 2 pulgadas de diámetro

Un tubo de cobre de aproximadamente 30 cm de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro fue lijado perfectamente para no dejar impurezas en la superficie y que al ser pintado se fijara mejor la mezcla.

El tubo de policarbonato de 2 pulgadas de diámetro, fue cortado hasta quedar con un largo de 35 cm.

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

Posteriormente un corcho de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro fue atorado en uno de los extremos del tubo de cobre y se fijó con silicón para que no tuviera fugas, otro corcho de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro fue perforado con el taladro hasta un diámetro un poco mayor al de la punta del termómetro de metal.

Un corcho de 2 pulgadas de diámetro fue atorado a un extremo del tubo de policarbonato y fijado con silicón, otro corcho de igual diámetro fue perforado hasta tener un diámetro un poco mayor al de la punta del termómetro de metal.

Para realizar la pintura absorbente radiativa, se utilizó un adhesivo sintético el cual fue mezclado con los residuos tamizados de la escoria de la malla 500 y la limadura de cobre, se le aplicó al tubo de cobre de 30 cm. Se le aplicaron dos capas de la mezcla al tubo hasta que quedó totalmente cubierta por ella. Y se dejó secar por dos semanas sin ser expuesto al sol.



Imagen 3.6. Mezcla de escoria de aceración, adhesivo y limadura de cobre



Imagen 3.7. Tubo cubierto por la pintura absorbente radiativa

Por otra parte se construyó una base de madera con un ángulo aproximadamente de 20° para aprovechar mejor la incidencia de los rayos del sol.



Imagen 3.8. Solarímetro en funcionamiento



Imagen 3.9. Solarímetro en funcionamiento

3.4 Resultados de las pruebas con solarímetro

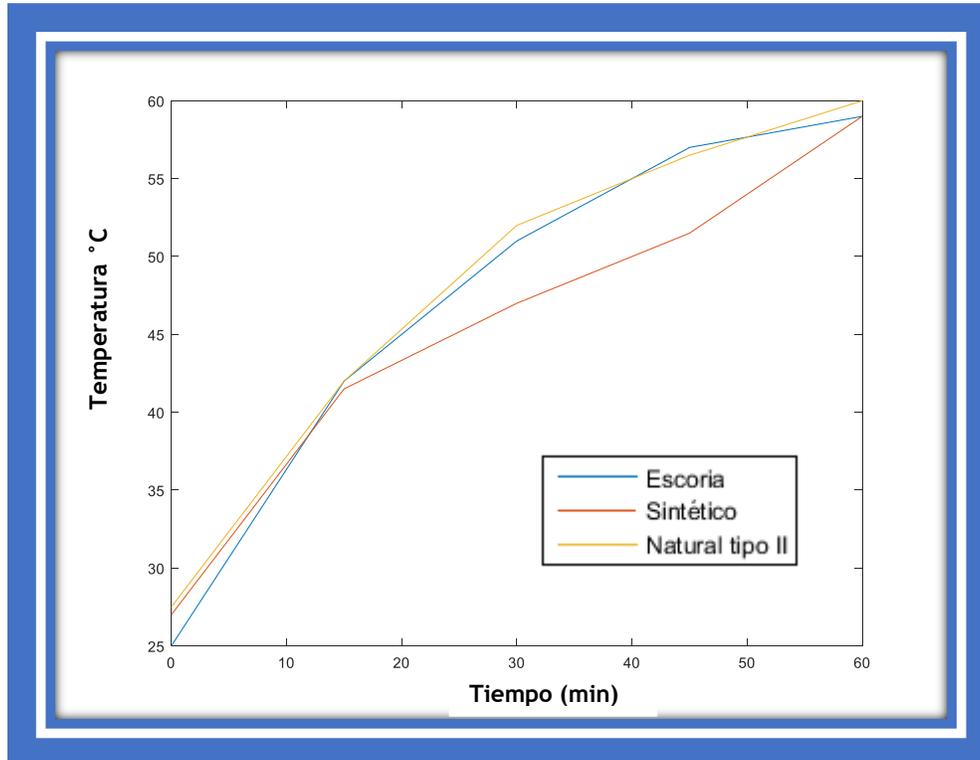
Los resultados de estas pruebas fueron comparados con datos de otras dos fórmulas de un trabajo ⁽¹⁶⁾ anterior a este, en donde se utilizó como recubrimiento un material sintético y un material hecho a base de biomasa devolatilizada, aunque cabe señalar que los meses en los que se hicieron las pruebas no fueron los mismos. A continuación se presentan los resultados:

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	25	1:00
15	39	1:15
30	41	1:30
45	51	1:45
60	55	2:00
75	56	2:15
90	59	2:30
105	58	2:45

Tabla 3.4.1. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 6/11/2018

12:42 a.m Tiempo (min)	Sintético Temperatura (°C)	Natural tipo II Temperatura (°C)
0	27	27.5
10	34.5	35.5
20	41.5	42
30	47	48
40	51.5	52
50	55.5	56.5
60	59	60

Tabla 3.4.2. Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 14/04/2011



Gráfica 3.4.1. Primera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

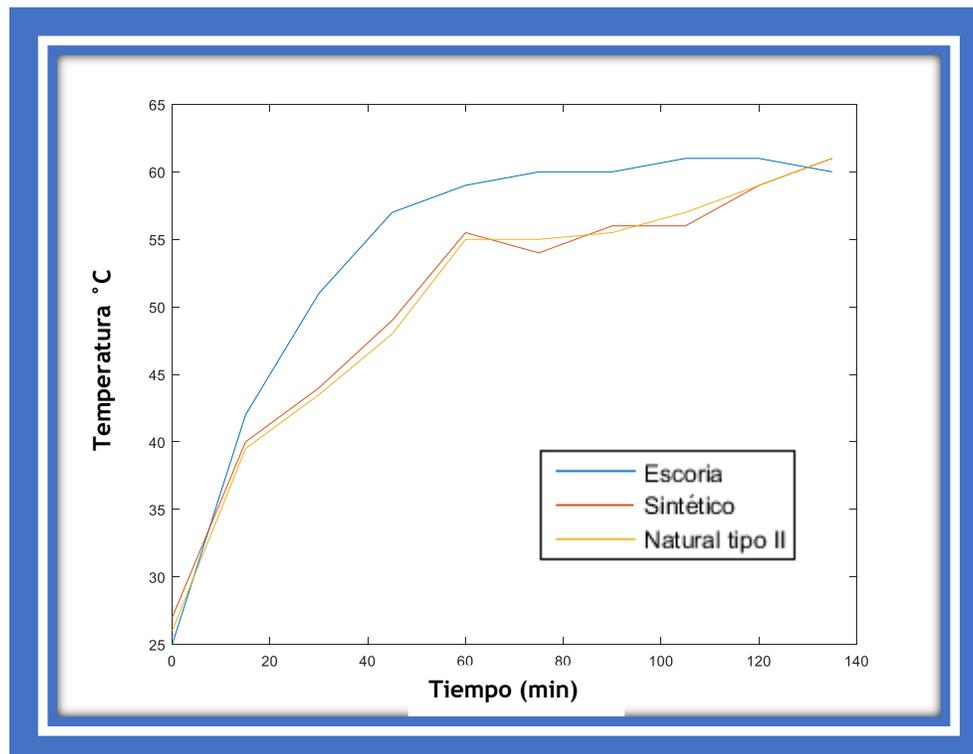
En la gráfica (3.4.1) se muestran el comportamiento de los 3 absorbentes, aunque en este trabajo nos enfocaremos en la escoria, como se puede ver hasta los primeros 15 minutos el comportamiento de los 3 es casi igual, a partir de ahí se ve como la escoria y el absorbente sintético tienen un comportamiento mejor que el material Natural tipo II, ya que elevan más que el su temperatura, y además se mantienen constantes.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	25	12:00
15	42	12:15
30	51	12:30
45	57	12:45
60	59	1:00
75	60	1:15
90	60	1:30
105	61	1:45
120	61	2:00
135	60	2:15
150	60	2:30

Tabla 3.4.3. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 8/11/2018

11:08 a.m	Sintético	Natural tipo II
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	27	26
10	34	34
30	44	43.5
60	55.5	55
90	56	55.5
120	59	59
140	63	63

Tabla 3.4.4. Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 26/04/2011



Gráfica 3.4.2. Segunda comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

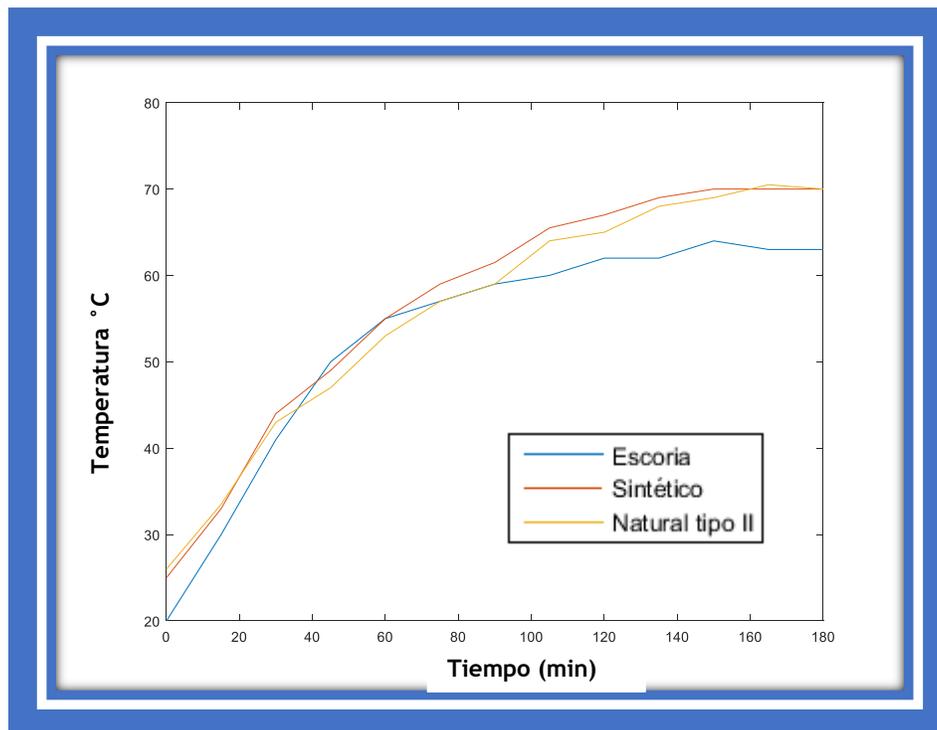
En esta gráfica (3.4.2) es fácil ver como a partir de los 20 minutos y hasta el término de la prueba la escoria se mantuvo en un ascenso constante, aunque al paso de los minutos terminaron los 3 absorbentes casi con la misma temperatura.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	20	12:15
15	30	12:30
30	41	12:45
45	50	1:00
60	55	1:15
75	57	1:30
90	59	1:45
105	60	2:00
120	62	2:15
135	62	2:30
150	64	2:45
165	63	3:00
180	63	3:15
195	62	3:30
210	61	3:45

Tabla 3.4.5. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 21/01/2019

11:34 a.m Tiempo (min)	Sintético Temperatura (°C)	Natural tipo II Temperatura (°C)
0	25	26
10	33	33.5
20	39	39
30	44	43
40	49	47
60	55	53
80	59	57
90	61.5	59
100	64	61
120	67	65
140	69	68
160	70	69.5
180	70	70
190	69.5	70

Tabla 3.4.6. Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 28/04/2011



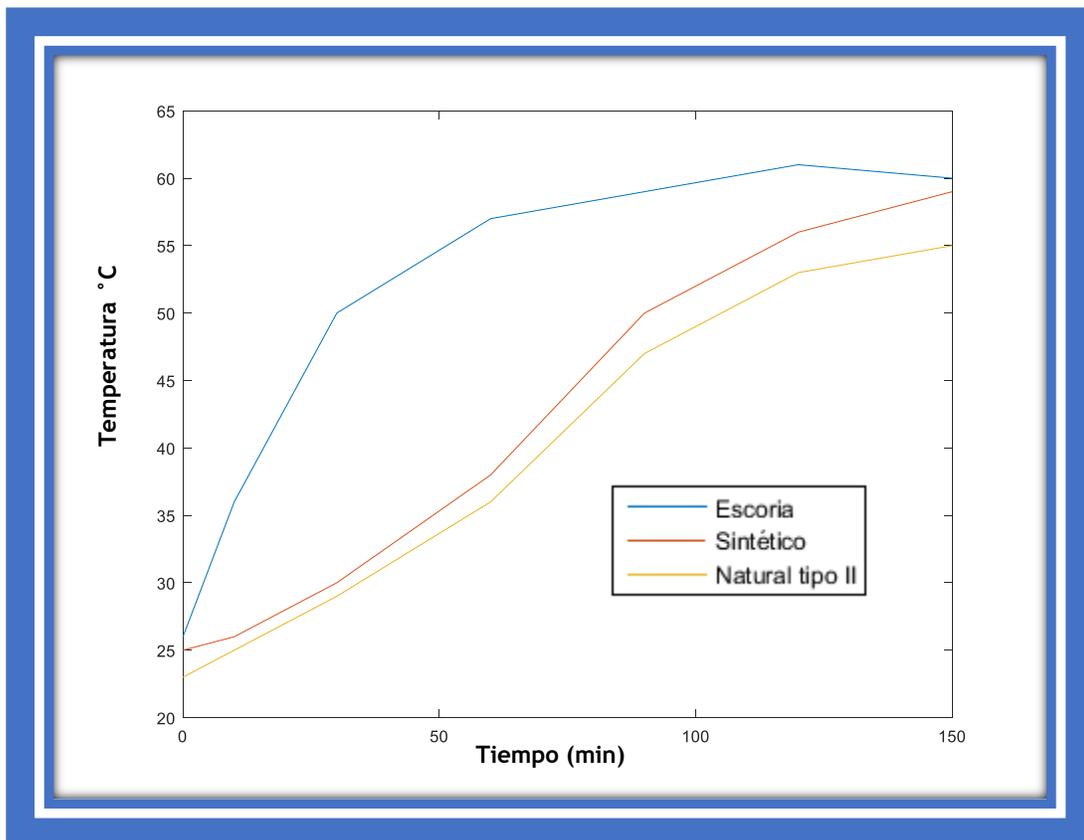
Gráfica 3.4.3. Tercera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	26	12:55
15	36	1:10
30	50	1:25
45	57	1:40
60	59	1:55
75	60	2:05
90	60	2:20
105	61	2:35
120	61	2:55
135	60	3:10
150	60	3:25
165	60	3:40
180	60	3:55

11:09 a.m	Sintético	Natural tipo II
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	25	23
10	26	25
30	30	29
60	38	36
90	50	47
120	56	53
150	59	55

Tabla 3.4.8. Datos de solarímetro a base de material sintético y natural tipo II del 3/04/2011

Tabla 3.4.7. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 22/01/2019



Gráfica 3.4.4. Cuarta comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Sintético, Natural tipo II

Desarrollo de una pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

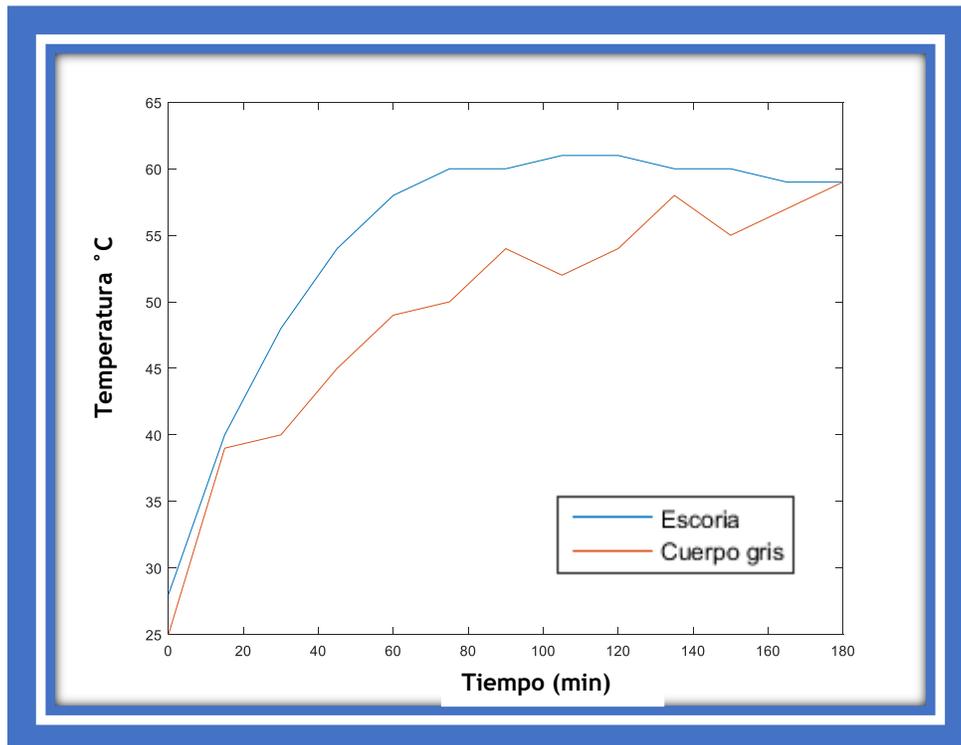
Además de las pruebas a la pintura a base de escoria, también se realizaron a un material absorbente llamado cuerpo gris, Por lo que a partir de aquí se puede ver la comparación de resultados de los dos materiales, en las gráficas posteriores (3.4.5, 3.4.6, 3.4.7) en donde se muestra como la pintura a base de escoria se mantiene constante y por arriba de la temperatura del cuerpo gris.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	28	1:00
15	40	1:15
30	48	1:30
45	54	1:45
60	58	2:00
75	60	2:15
90	60	2:30
105	61	2:45
120	61	3:00
135	60	3:15
150	60	3:30
165	59	3:45
180	59	4:00

Tabla 3.4.9. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 23/01/2019

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	25	12:25
15	39	12:40
30	40	12:55
45	45	1:10
60	49	1:25
75	50	1:40
90	54	1:55
105	52	2:10
120	54	2:25
135	58	2:40
150	55	2:55
165	57	3:10
180	59	3:25

Tabla 3.4.10. Datos de solarímetro material cuerpo gris 31/09/2018



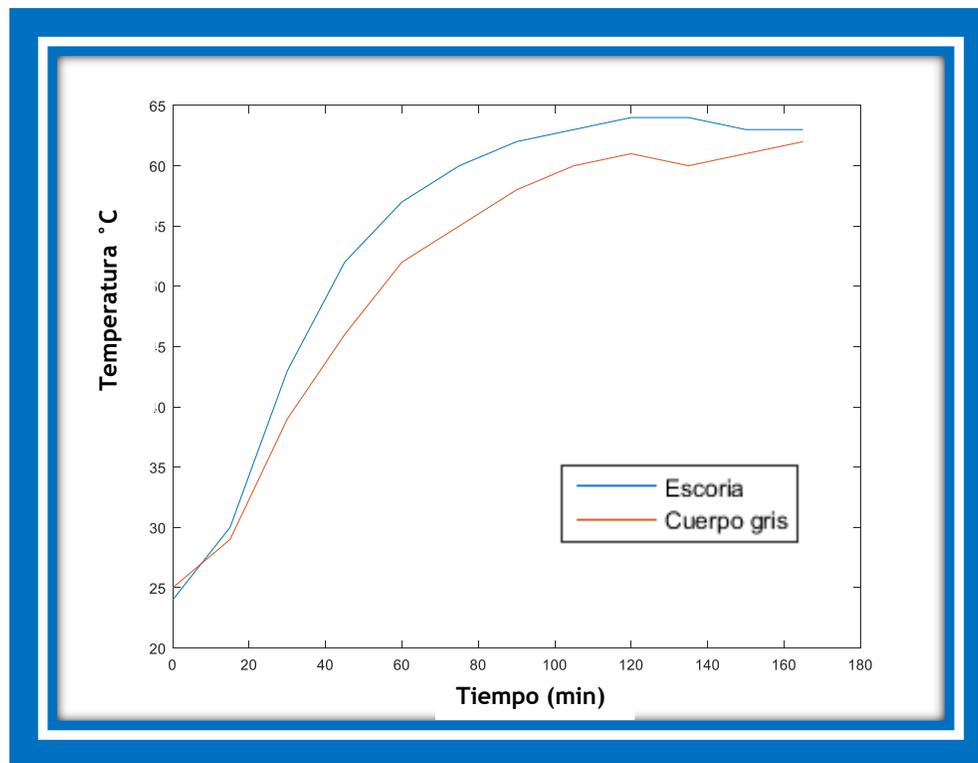
Gráfica 3.4.5. Primera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	24	12:15
15	30	12:30
30	43	12:45
45	52	1:00
60	57	1:15
75	60	1:30
90	62	1:45
105	63	2:00
120	64	2:15
135	64	2:30
150	63	2:45
165	63	3:00
180	62	3:15

Tabla 3.4.11. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 28/01/2019

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	25	12:45
15	29	1:00
30	39	1:15
45	46	1:30
60	52	1:45
75	55	2:00
90	58	2:15
105	60	2:30
120	61	2:45
135	60	3:00
150	61	3:15
165	62	3:30

Tabla 3.4.12. Datos de solarímetro material cuerpo gris 20/09/2018



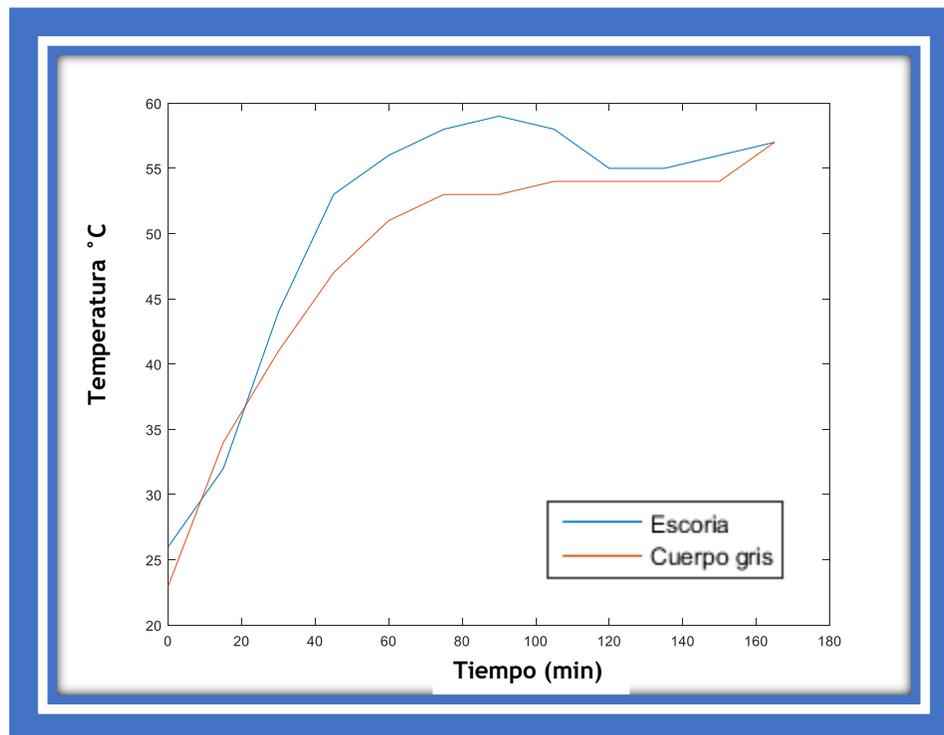
Gráfica 3.4.6. Segunda comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
0	26	1:15
15	32	1:30
30	44	1:45
45	53	2:00
60	56	2:15
75	58	2:30
90	59	2:45
105	58	3:00
120	55	3:15
135	55	3:30
150	56	3:45
165	57	4:00

Tabla 3.4.13. Datos de solarímetro pintura a base de escoria de aceración del 31/01/2019

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Hora (min)
Adhesivos	Sintético	
t(min)	T(°C)	Hora
0	23	12:45
15	34	1:00
30	41	1:15
45	47	1:30
60	51	1:45
75	53	2:00
90	53	2:15
105	54	2:30
120	54	2:45
135	54	3:00
150	54	3:15
165	57	3:30

Tabla 3.4.14. Datos de solarímetro material cuerpo gris 17/09/2018



Gráfica 3.4.7. Tercera comparación del comportamiento de las Temperaturas con solarímetro: Escoria, Cuerpo gris.

El total de pruebas realizadas con el solarímetro a la pintura absortiva radiativa a base de escoria fueron alrededor de 12 pero las reportadas en el trabajo fueron 7 ya que se eligieron las pruebas realizadas en días soleados.

Las pruebas realizadas con el solarímetro se utilizaron para poder probar si el material que va a recubrir a la placa absorbente en el prototipo de colector solar, en este caso la pintura absortiva radiativa a partir de escoria de aceración es en realidad una buena elección, se podría decir que es la primera prueba que debe pasar, ya que con los resultados se puede predecir el comportamiento que tendrá la temperatura del agua dentro del colector por este tipo de pruebas.

Se compararon los resultados con otros materiales para poder saber si alcanza temperaturas mayores a ellos, en cuanto tiempo lo logra y cómo se comporta la temperatura del agua dentro de él, cuando la irradiación solar comienza a descender al pasar las horas del día, ya que es muy importante esta parte porque muchas veces en el transcurso de este, las nubes cubren el sol, por lo que la temperatura del colector tiende a descender y es importante que este ya tenga una temperatura alta en su interior para que no afecte tanto a la temperatura del agua, ya que buscamos que su uso sea doméstico (bañarse, lavar trastes, etc.).

Finalmente a pesar que las mediciones no se hicieron en los mismos meses, el comportamiento de la temperatura vs el tiempo en el caso de la pintura a base de escoria no se vio tan afectado, aún sabiendo que en los meses en los cuales se tomaron los datos de temperatura (Noviembre, Diciembre y Enero) la irradiancia es baja en comparación con los demás meses del año, y sin importar eso en varios casos su temperatura llegó a incrementarse igual o más que los demás absorbedores, en donde los meses en que se les hicieron las pruebas la irradiancia es mayor, por lo que se puede inferir que la pintura absortiva-radiativa a base de escoria de aceración puede ser un buen material como absorbedor en un colector solar y se procedió a comprobarlo.

A large solar water heater is mounted on a rooftop. The collector is a large, dark blue rectangular panel with a silver frame, tilted at an angle. A silver cylindrical tank is attached to the top of the collector. The background shows a blue sky with white clouds and other solar water heaters on the roof.

Capítulo IV

***“Prototipo
experimental”***

4.1 Construcción del prototipo

Después de analizar los resultados obtenidos de las pruebas con el solarímetro, se optó por probar la pintura absorbente radiativa hecha en base a escoria de aceración en un prototipo de colector solar, para conocer que rendimiento obtendría en base a su eficiencia térmica global, además de hacer una estimación acerca del costo que tendría un colector solar plano casero agregando este material como absorbente.

Placa absorbedora



Imagen 4.1. Placa absorbedora de 20 tubos de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada antes del recubrimiento

La placa absorbedora que se utilizó fue hecha por 20 tubos de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada, teniendo un área de 0.3 m^2 . Se recubrió con una mezcla hecha de escoria de aceración molida y posteriormente tamizada, limadura de cobre, un adhesivo comercial para que pudiera fijarse a los tubos de cobre, los espacios que había de separación entre ellos fueron cubiertos por la mezcla para convertirse en una placa.



Imagen 4.2. Placa absorbedora hecha por escoria de aceración, limadura de cobre y un adhesivo

Carcasa

Como carcasa del prototipo se utilizó una caja hecha de lámina galvanizada de 110 cm de largo, 50 cm de ancho y 10 cm de alto, fue sellada con silicón para evitar el paso del aire y reducir las pérdidas de calor por alguna fuga interna. También se le hicieron dos orificios de cada lado, un poco mayores a $\frac{1}{2}$ pulgada que es el diámetro

Desarrollo de una pintura absorbtiva-radiativa a partir de escoria de aceración para colectores solares

de los extremos de los tubos que se encuentran como salidas de la placa, y uno en el centro ya que ahí pondremos un termómetro.



Imagen 4.3. Caja de lámina galvanizada

Aislante y placa transparente

Para el aislante se decidió utilizar fibra de vidrio por ser un conductor térmico relativamente alto, ser resistente, por su degradación con el paso del tiempo el cual es superior a otros aislantes y porque su precio no es tan alto comparado con otros. Se cubrió aproximadamente 8 cm de la carcasa con este material.

Como placa transparente se utilizó un vidrio de 3 mm de espesor, de 115 cm de largo y 55 cm de ancho.



Imagen 4.4. Carcasa recubierta por fibra de vidrio, y dentro la placa absorbidora



Imagen 4.5. Fibra de vidrio



Imagen 4.6. Carcasa recubierta por fibra de vidrio, dentro la placa absorbidora, y cubierta por una capa de vidrio

Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento utilizado tiene 60cm de largo y 46 cm de diámetro, está hecho de lámina galvanizada y tiene 7.5 cm de fibra de vidrio como aislante, tiene una capacidad de 30 litros. Cuenta con dos salidas laterales de cada lado y una por la parte inferior.



Imagen 4.7. Tanque de almacenamiento vista lateral



Imagen 4.8. Tanque de almacenamiento vista de una de las tapas

Base del prototipo

Se construyó una base con barras de metal (PTR) para sostener al prototipo con dimensiones de 2.25 m de largo, 46 cm de ancho y 95cm de alto.



Imagen 4.9. Soporte antes de la instalación



Imagen 4.10. Soporte durante la instalación

4.2 Instalación del prototipo

Para la instalación del prototipo primero se soldaron los dos tubos de salida de la placa absorbente con un codo cada una, para que posteriormente fueran fijadas con abrazaderas y silicón dos mangueras de aproximadamente 1.50 m de largo.

El otro extremo de las mangueras se conectó a las salidas del tanque fijadas igualmente con abrazaderas y con silicón. Además se agregó un termómetro en la salida de cada extremo de la carcasa, como también un termómetro al centro de la caja, que estuviera en contacto con la placa absorbente, teniendo un total de 5 termómetros contando los dos que tiene el tanque de almacenamiento uno arriba y uno abajo. Finalmente, el tanque fue llenado por la parte superior del tanque para que el agua comenzara a circular por todo el prototipo, cuidando que no existieran fugas.



Imagen 4.11. Termómetros instalados en la carcasa del prototipo



Imagen 4.12. Termómetros instalados en el tanque de almacenamiento



Imagen 4.13. Instalación de una manguera a la carcasa del prototipo



Imagen 4.14. Prototipo de colector solar en funcionamiento

4.3 Análisis térmico del prototipo de colector solar

En el análisis térmico de un colector solar de placa plana es necesario considerar: sus componentes (Imagen 2.1), los flujos de calor que se presentan (Imagen 4.15), las condiciones hidrodinámicas y las simplificaciones pertinentes.

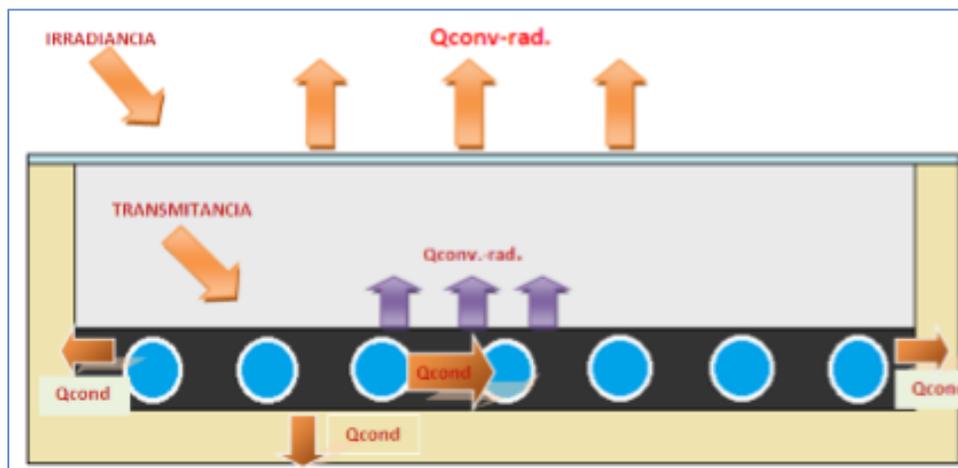


Imagen 4.15. Análisis térmico de un colector solar de placa plana

Como puede observarse en la figura 4.15, en el colector solar de placa plana hay transferencia de calor hacia: el fluido, el aire interior, el aislante, la cubierta de vidrio y el ambiente.

Para comenzar el análisis del colector solar es necesario calcular la temperatura de la cubierta de vidrio que cumpla con el estado estable, por la condición de continuidad, donde el flujo de calor convectivo-radiativo de la placa a la cubierta de vidrio es igual a flujo de calor convectivo-radiativo de la cubierta de vidrio al ambiente.

$$Q_{\text{placa-vidrio}} = Q_{\text{vidrio-ambiente}} \quad \text{Ec. (4.1.1)}$$

$$(hrpv + hcpv)(T_p - T_v) * A_c = (hrva + hcva) (T_v - T_a) * A_c \quad \text{Ec. (4.1.2)}$$

El cálculo de la temperatura de vidrio que cumpla con la condición de continuidad es un procedimiento iterativo, considerando el área del absorbedor como el área del colector. Esta área es la misma para la transferencia de calor de la placa al vidrio y del vidrio al ambiente. Se procede como sigue:

Teniendo la temperatura de placa y la temperatura ambiente, se propone una temperatura de vidrio:

$$T_{v0} = T_{\text{placa}} - 20 \quad \text{Ec. (4.1.3)}$$

Determinar las propiedades del aire, a una temperatura media entre la placa y el vidrio

$$T_{\text{aire}} = \frac{T_{\text{placa}} + T_{v0}}{2} \quad \text{Ec. (4.1.4)}$$

$$k = 2.47663035 * 10^{-17} T^5 - 1.066657 * 10^{-13} T^4 + 1.73550643 * 10^{-10} T^3 - 1.4815235 * 10^{-7} T^2 + 1.2598485 * 10^{-4} T - 2.276501 * 10^{-3} \quad [=] W/mK$$

$$C_p = [0.1077024 * 10^{-12} T^4 - 0.4970786 * 10^{-9} T^3 + 0.7816818 * 10^{-6} T^2 - 0.284887 * 10^{-3} T + 0.103409 * 10] * 1.0E03 \quad [=] KJ / KgK$$

$$\mu = (-5.7971299 * 10^{-11} T^4 + 1.2349703 * 10^{-7} T^3 - 1.17635575 * 10^{-4} T^2 + 9.080125 * 10^{-2} T - 9.8601 * 10^{-1}) * 1.0E - 06 \quad [=] N.s / m^2$$

$\rho = 1.1993 = Kg / m^3$ (valor comúnmente usado a condiciones estándar de presión y temperatura)

Determinar el número de Grashof

$$Gr = \frac{D^3 \rho^2 g (T_{\text{placa}} - T_{v0}) \beta}{\mu^2} \quad \text{Ec. (4.1.5)}$$

Donde:

D : Es la longitud característica (Área/Perímetro)

ρ : Es la densidad del aire (Kg/m^3)

g : Es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

β : Es el coeficiente de expansión volumétrica ($1/T$)

μ : Es la viscosidad del aire (Kg/m.s)

Determinar el número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad \text{Ec. (4.2.1)}$$

Donde:

C_p : Es la capacidad calorífica del aire (J/Kg K)

k : Es la conductividad térmica del aire (W/m K)

Determinar el número de Rayleigh

$$Ra = Gr Pr \quad \text{Ec. (4.2.2)}$$

Determinar el número de Nusselt

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad \text{para } 104 < Ra < 10^7 \quad \text{Ec. (4.2.3)}$$

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3} \quad \text{para } 10^7 < Ra < 10^{11} \quad \text{Ec. (4.2.4)}$$

Determinar el coeficiente convectivo

$$Nu = \frac{hd}{k} \rightarrow h_{cpv} = \frac{Nuk}{D} \quad \text{Ec. (4.2.5)}$$

Determinar el coeficiente radiativo

$$h_{rpv} = \frac{\sigma(T_{placa}^2 + T_{v0}^2)(T_{placa} + T_{v0})}{\frac{1}{\epsilon_{placa}} + \frac{1}{\epsilon_{vidrio}} - 1} \quad \text{Ec. (4.2.6)}$$

Donde:

ϵ_{placa} : Es el coeficiente de emisividad de la placa

ϵ_{vidrio} : Es el coeficiente de emisividad del vidrio

σ : Es la constante de Stefan Boltzman ($5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

Para estimar los coeficientes convectivo y radiativo de la transferencia de calor de la cubierta de vidrio al medio ambiente se:

Determinar las propiedades del aire a temperatura ambiente

$$k = 2.47663035 * 10^{-17} T^5 - 1.066657 * 10^{-13} T^4 + 1.73550643 * 10^{-10} T^3 - 1.4815235 * 10^{-7} T^2 + 1.2598485 * 10^{-4} T - 2.276501 * 10^{-3} \quad [=] W/mK * 10^{-3}$$

$$Cp = 0.1077024 * 10^{-12} T^4 - 0.4970786 * 10^{-9} T^3 + 0.7816818 * 10^{-6} T^2 - 0.284887 * 10^{-3} T + 0.103409 * 10 \quad [=] KJ / KgK$$

$$\mu = -5.7971299 * 10^{-11} T^4 + 1.2349703 * 10^{-7} T^3 - 1.17635575 * 10^{-4} T^2 + 9.080125 * 10^{-2} T - 9.8601 * 10^{-1} \quad [=] N.s/m^2 * 10^{-6}$$

$\rho = 1.1993 = Kg/m^3$ (valor comúnmente usado a condiciones estándar de presión y temperatura)

Determinar el número de Grashof

$$Gr = \frac{D^3 \rho^2 g \cos \theta (T_{v0} - T_{ambiente}) \beta}{\mu^2} \quad Ec. (4.3.1)$$

Donde:

θ : Es el ángulo de inclinación del colector

Determinar el número de Prandtl

$$Pr = \frac{Cp \mu}{k} \quad Ec. (4.3.2)$$

Determinar el número de Rayleigh

$$Ra = Gr Pr \quad Ec. (4.3.3)$$

Determinar el número de Nusselt

$$Nu = \left[\left(0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/4}}{(1 + (0.492 Pr)^{9/16})^{2/7}} \right)^2 \right] \quad Ec. (4.3.4)$$

Determinar el coeficiente convectivo

$$Nu = \frac{hd}{k} \rightarrow hcva = \frac{Nuk}{D} \quad Ec. (4.3.5)$$

Calcular la temperatura de cielo (Swimbak, 1963)

$$T_{cielo} = 0.0552 (T_{ambiente})^{1.5} \quad Ec. (4.3.6)$$

Determinar el coeficiente radiativo

$$hrva = \frac{\sigma \varepsilon (T_{vidrio}^4 + T_{cielo}^4) (T_{placa} + T_{v0})}{T_{vidrio} - T_{ambiente}} \quad Ec. (4.3.7)$$

Determinar la nueva temperatura de vidrio

$$T_{vi} = \frac{T_p(h_{rpv} + h_{cpv}) + T_a(h_{rva} + h_{cva})}{h_{rpv} + h_{cpv} + h_{rva} + h_{cva}} \quad \text{Ec. (4.2.8)}$$

Si la condición $|T_{vj} - T_{vi}| = 1 \times 10^{-5}$ se cumple, T_{vi} es la temperatura de vidrio que nos interesa. De no ser así, $T_{vj} = T_{vi}$ y regresamos al paso 1 hasta que se cumpla la condición antes mencionada.

Cuando ya se tiene la temperatura de vidrio se puede calcular la eficiencia del colector, para esto es necesario calcular el coeficiente global de pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor hacia el fluido.

Si G es la intensidad de la radiación solar, en W/m^2 , que incide sobre el plano del colector solar con un área A_c , en m^2 ; entonces, la cantidad de radiación solar recibida por el colector o calor entrante al captador (en W) puede expresarse mediante la siguiente ecuación

$$Q_e = G A_c \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Sin embargo, una fracción de estas radiaciones es reflejada hacia la atmósfera. La cubierta transparente absorbe algunos componentes de la luz solar y deja pasar radiaciones de onda corta hacia la placa absorbidora. Por lo tanto, el porcentaje de la radiación solar, que atraviesa la cubierta transparente del colector y la fracción de radiación absorbida por ella, se consideran en un factor de conversión. Básicamente, este factor es el producto de la rapidez de transmitancia de la cubierta de vidrio y la rapidez de absorción de la placa absorbidora y puede expresarse como sigue:

$$Q_e = G (\tau \alpha) A_c \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Donde $\tau \alpha$ son los coeficientes de transmitancia de la cubierta transparente y de absorbancia de la placa absorbidora, respectivamente.

A medida que el colector absorbe radiación solar, su temperatura llega a ser mayor que la de los alrededores y transmite energía a la atmósfera por convección y radiación. La rapidez de pérdida de calor, Q_p , depende del coeficiente global de transferencia de calor, U_t , de la temperatura del colector, T_c y de la temperatura ambiente, T_a . La rapidez de pérdida de calor puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$Q_p = A_c U_t (T_c - T_a) \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Donde Q_p es el calor perdido, en W ; U_t es el coeficiente global de pérdidas de calor, en W/m^2 ; T_c es la temperatura promedio del colector, en K ; y T_a es la temperatura ambiental en K .

De modo que, la rapidez de extracción de energía útil del colector Q_u , bajo condiciones de estado estable, es proporcional a la rapidez de energía absorbida

por el colector, menos la cantidad de calor transferida por el captador hacia los alrededores, lo que se expresa como sigue:

$$Q_u = Q_e - Q_p = A_c [G(\tau\alpha) - U_t(T_c - T_a)] \quad \text{Ec. (4.6)}$$

Donde Q_u es la energía útil ganada por el fluido de trabajo (agua), en W.

La rapidez de extracción de calor de un colector puede ser medida mediante la cantidad de calor retirada por el fluido que pasa a través de él y puede expresarse como:

$$Q_u = m C_p (T_s - T_e) \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Donde m es el flujo másico del fluido de trabajo o fluido portador, en Kg/s; C_p es el calor específico del fluido de trabajo, J/kg K; T_e es la temperatura del fluido portador a la entrada del colector; y T_s es la temperatura del fluido de trabajo a la salida del captador solar.

La ecuación (4.6) es inapropiada debido a la dificultad para determinar la temperatura promedio del colector. Por lo tanto, se define una cantidad que relaciona la energía útil ganada de la superficie de un colector que está a la temperatura del fluido de entrada. Esta cantidad es conocida como factor de remoción de calor, FR , que se expresa como:

$$FR = (T_s - T_e) A_c [G(\tau\alpha) - U_t(T_e - T_a)] \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Cuando el colector tiene una temperatura igual a la del fluido entrante se obtiene la máxima ganancia posible de energía en un colector solar, porque las pérdidas de calor al medio ambiente son las mínimas posibles. El producto del factor de remoción de calor del colector y la ganancia máxima posible de energía da el calor útil ganado, permitiendo que la ecuación (4.6) se reescriba. Esta ecuación fue encontrada por Hottel-Whillier-Bliss:

$$Q_u = A_c FR [G(\tau\alpha) - U_t(T_c - T_a)] \quad \text{Ec. (4.9)}$$

La eficiencia de un colector es la medida del comportamiento del colector, que se define como el cociente de la energía útil ganada, Q_u , y la energía solar incidente en un periodo particular de tiempo:

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G dt} \quad \text{Ec. (4.10)}$$

Y la eficiencia térmica del colector es:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} \quad \text{Ec. (4.11)}$$

Sustituyendo la ecuación (4.9) en (4.11), se tiene

$$\eta = \frac{FR Ac [G \tau\alpha - UL (Te - Ta)]}{Ac G} \quad \text{Ec. (4.12)}$$

O bien separando términos

$$\eta = FR \tau\alpha - FR UL \left(\frac{Te - Ta}{G} \right) \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Cabe señalar que los resultados de éste análisis térmico del prototipo de colector solar fueron determinados a través de un código Matlab que se encuentra referido en el Anexo del presente trabajo.

Para el análisis térmico del prototipo de colector solar se utilizaron las temperaturas siguientes:

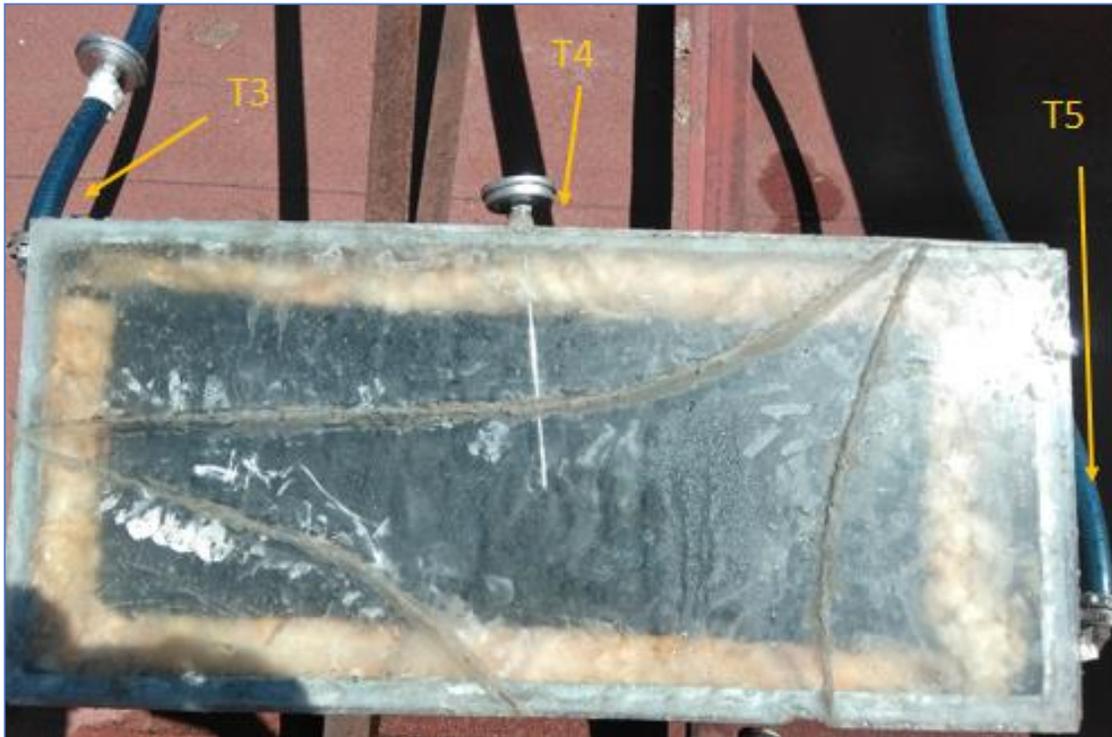


Imagen 4.16. Distribución de los termómetros en el tanque de almacenamiento

Donde:

T1 = Temperatura del agua por la parte superior del tanque

T2 = Temperatura del agua por la parte inferior del tanque



Donde:

T3 = Temperatura del agua al salir de la placa absorbadora

T4 = Temperatura de la placa absorbadora

T5 = Temperatura del agua al entrar en la placa absorbadora

Capítulo

V

“Análisis de resultados”



5.1 Resultados de las pruebas con el prototipo de colector solar plano

Se realizaron 10 mediciones, una por día, para el análisis de los datos, de los cuales se eligieron 3 de los mejores rendimientos para presentarse en el presente trabajo.

Se muestran en las siguientes tablas los datos de temperatura obtenidos de los 3 días diferentes, la hora que fue tomada cada lectura y el tiempo en que se realizó la medición.

07/12/2018 Hora(min)	Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)
13:00	0	42	34	42	61	30
13:15	15	43	34	43	66	30
13:30	30	45	35	44	66	31
13:45	45	45	35	45	66	31
14:00	60	46	37	47	66	32
14:15	75	47	37	48	66	32
14:30	90	47	39	49	67	33
14:45	105	48	40	50	66	34
15:00	120	47	41	47	70	35
15:15	135	48	43	50	65	35
15:30	150	48	44	50	64	35
15:45	165	48	44	50	64	35
16:00	180	48	45	50	61	36

Tabla 5.1. Datos de Temperatura prototipo de colector solar 07/12/2018

29/01/2019 Hora(min)	Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)
13:45	0	46	38	46	66	34
14:00	15	46	38	46	67	34
14:15	30	47	40	48	67	35
14:30	45	48	41	48	67	35
14:45	60	49	42	50	67	36
15:00	75	49	43	50	67	36
15:15	90	49	44	50	65	36
15:30	105	50	45	51	65	36
15:45	120	50	45	51	64	36
16:00	135	50	45	51	64	36

Tabla 5.2. Datos de Temperatura prototipo de colector solar 29/01/2019

31/01/2019 Hora(min)	Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)
13:20	0	47	33	49	70	31
13:30	10	47	34	49	69	32
13:45	35	48	36	50	70	34
14:00	50	50	38	52	71	34
14:15	65	50	40	53	70	35
14:30	80	51	41	54	70	35
14:45	95	52	43	54	71	36
15:00	110	52	44	53	66	36
15:15	125	52	45	51	63	36
15:30	140	51	45	53	66	36
15:45	155	52	45	56	69	37
15:55	170	53	46	55	67	37

Tabla 5.3. Datos de Temperatura prototipo de colector solar 31/01/2019

5.2 Resultados del análisis térmico del sistema

En base a las lecturas de temperatura se realizó el análisis térmico del sistema en donde entre otros datos se obtuvieron:

07/12/2018 Hora(min)	tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	hcpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hcva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hf [$\frac{Wm^2}{K}$]	eficiencia
13:00	0	42	34	42	61	30	5.1872	5.3479	3.5161	10.9499	36.8043	0.4757
13:15	15	43	34	43	66	30	5.3156	5.5547	3.9173	9.1792	37.0847	0.4707
13:30	30	45	35	44	66	31	5.2419	5.5733	3.7312	9.739	37.6457	0.479
13:45	45	45	35	45	66	31	5.2202	5.5885	3.7743	9.5647	37.9263	0.4811
14:00	60	46	37	47	66	32	5.2202	5.5885	3.7743	9.5647	38.7683	0.4813
14:15	75	47	37	48	66	32	5.1542	5.6114	3.6713	9.8438	39.049	0.4903
14:30	90	47	39	49	67	33	5.207	5.6444	3.7921	9.4337	39.6102	0.4839
14:45	105	48	40	50	66	34	5.2215	5.5881	3.4653	10.7449	40.1713	0.4903
15:00	120	47	41	47	70	35	5.2967	5.7678	4.0247	8.7279	39.6102	0.4668
15:15	135	48	43	50	65	35	5.5654	5.6648	3.7565	9.6963	40.4517	0.4662
15:30	150	48	44	50	64	35	5.181	5.5004	3.2901	11.8403	40.4517	0.4881
15:45	165	48	44	50	64	35	5.2459	5.478	3.7387	9.8284	40.4517	0.4664
16:00	180	48	45	50	61	36	5.1544	5.3589	3.455	11.2309	40.732	0.4696

Tabla 5.4. Datos de Temperatura, coeficientes de: convección, radiación, y eficiencia de prototipo de colector solar 07/12/2018

29/01/2019 Hora(min)	tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	hcpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hcva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hf [$\frac{Wm^2}{K}$]	eficiencia
13:45	0	46	38	46	66	34	5.2202	5.5885	3.7743	9.5647	39.049	0.4721
14:00	15	46	38	46	67	34	5.2396	5.633	3.8406	9.3155	39.049	0.4713
14:15	30	47	40	48	67	35	5.174	5.656	3.7422	9.555	39.8908	0.4786
14:30	45	48	41	48	67	35	5.207	5.6444	3.7921	9.4337	39.8908	0.4746
14:45	60	49	42	50	67	36	5.2396	5.633	3.8406	9.3155	40.732	0.4688
15:00	75	49	43	50	67	36	5.2396	5.633	3.8406	9.3155	40.732	0.4688
15:15	90	49	44	50	65	36	5.2332	5.5331	3.7565	9.6963	40.732	0.4659
15:30	105	50	45	51	65	36	5.2007	5.5443	3.7051	9.8495	41.0121	0.4716
15:45	120	50	45	51	64	36	5.2459	5.478	3.7387	9.8284	41.0121	0.4632
16:00	135	50	45	51	64	36	5.2137	5.4892	3.6866	9.9984	41.0121	0.4678

Donde:

hcpv: Coeficiente de calor de la energía absorbida por la transferencia de calor convectivo de la placa absorbidora

hrpv: Coeficiente de calor de la energía absorbida mediante la transferencia radiativa del absorbedor

hcva: Coeficiente de calor de la energía transferida al medio ambiente por convección

hrva: Coeficiente de calor de la energía transferida a los alrededores por radiación

hf: Coeficiente de transferencia de calor de la placa hacia el fluido

31/01/2019 Hora(min)	Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	hcpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrpv [$\frac{Wm^2}{K}$]	hcva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hrva [$\frac{Wm^2}{K}$]	hf [$\frac{Wm^2}{K}$]	eficiencia
13:20	0	47	33	49	70	31	5.3899	5.733	4.1474	8.4855	39.049	0.473
13:30	10	47	34	49	69	32	5.3095	5.711	4.009	8.8111	39.3296	0.4782
13:45	35	48	36	50	70	34	5.2967	5.7678	4.0247	8.7279	40.1713	0.4749
14:00	50	50	38	52	71	34	5.3154	5.8132	4.0819	8.5727	40.732	0.4766
14:15	65	50	40	53	70	35	5.2324	5.7912	3.9377	8.8877	41.2921	0.4834
14:30	80	51	41	54	70	35	5.2648	5.7794	3.9818	8.8081	41.5719	0.4799
14:45	95	52	43	54	71	36	5.3154	5.8132	4.0819	8.5727	41.8516	0.47
15:00	110	52	44	53	66	36	5.2202	5.5885	3.7743	9.5647	41.5719	0.4729
15:15	125	52	45	51	63	36	5.1941	5.4455	3.6133	10.347	41.0121	0.4688
15:30	140	51	45	53	66	36	5.2202	5.5885	3.7743	9.5647	41.5719	0.4729
15:45	155	52	45	56	69	37	5.3407	5.6995	4.0514	8.7213	42.689	0.4589
15:55	170	53	46	55	67	37	5.2716	5.6216	3.8876	9.1999	42.4101	0.4647

Tabla 5.6. Datos de Temperatura, coeficientes de: convección, radiación, y eficiencia de prototipo de colector solar 31/01/2019

Donde:

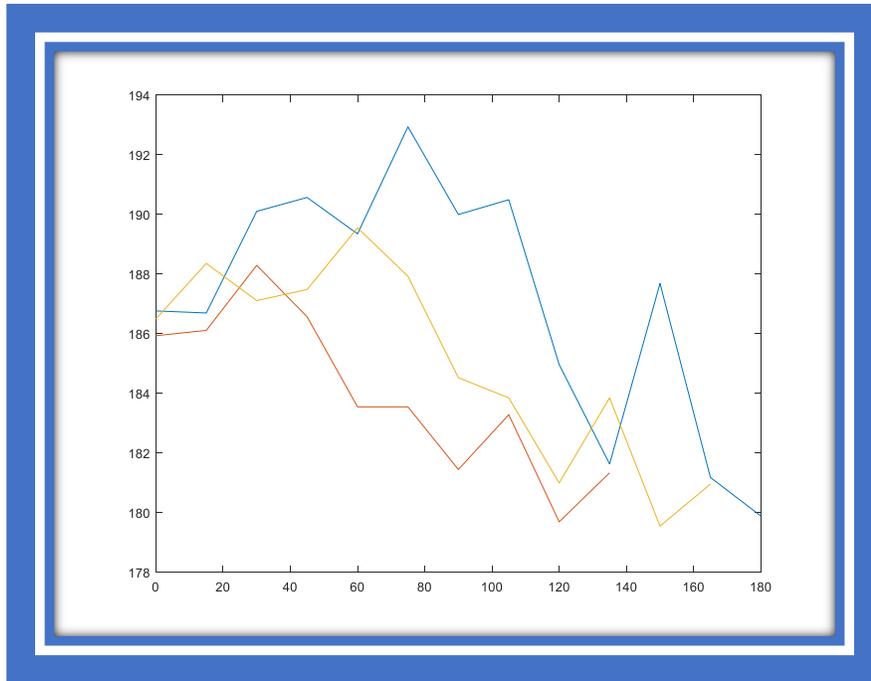
hcpv: Coeficiente de calor de la energía absorbida por la transferencia de calor convectivo de la placa absorbidora

hrpv: Coeficiente de calor de la energía absorbida mediante la transferencia radiativa del absorbedor

hcva: Coeficiente de calor de la energía transferida al medio ambiente por convección

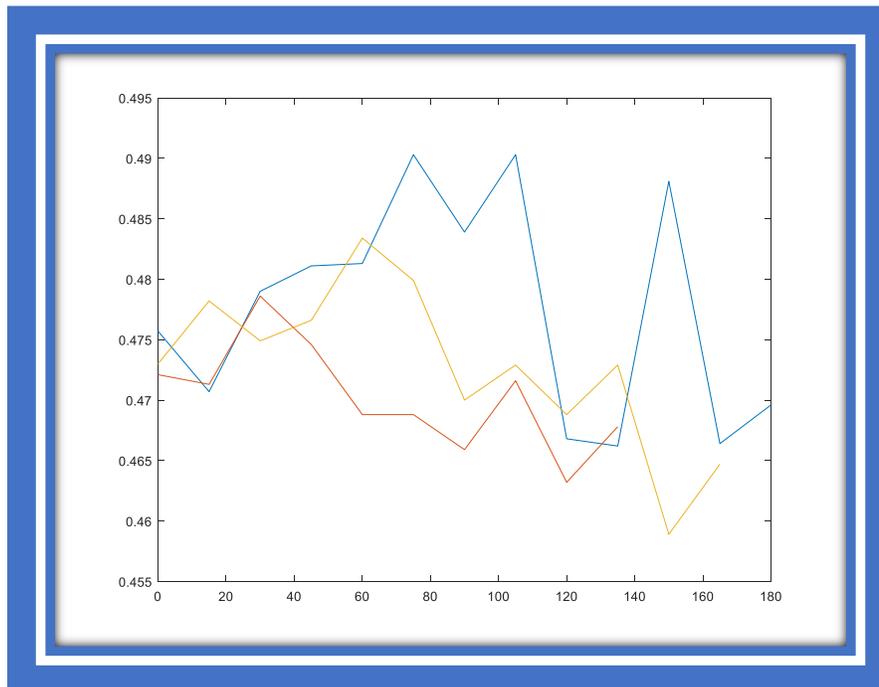
hrva: Coeficiente de calor de la energía transferida a los alrededores por radiación

hf: Coeficiente de transferencia de calor de la placa hacia el fluido

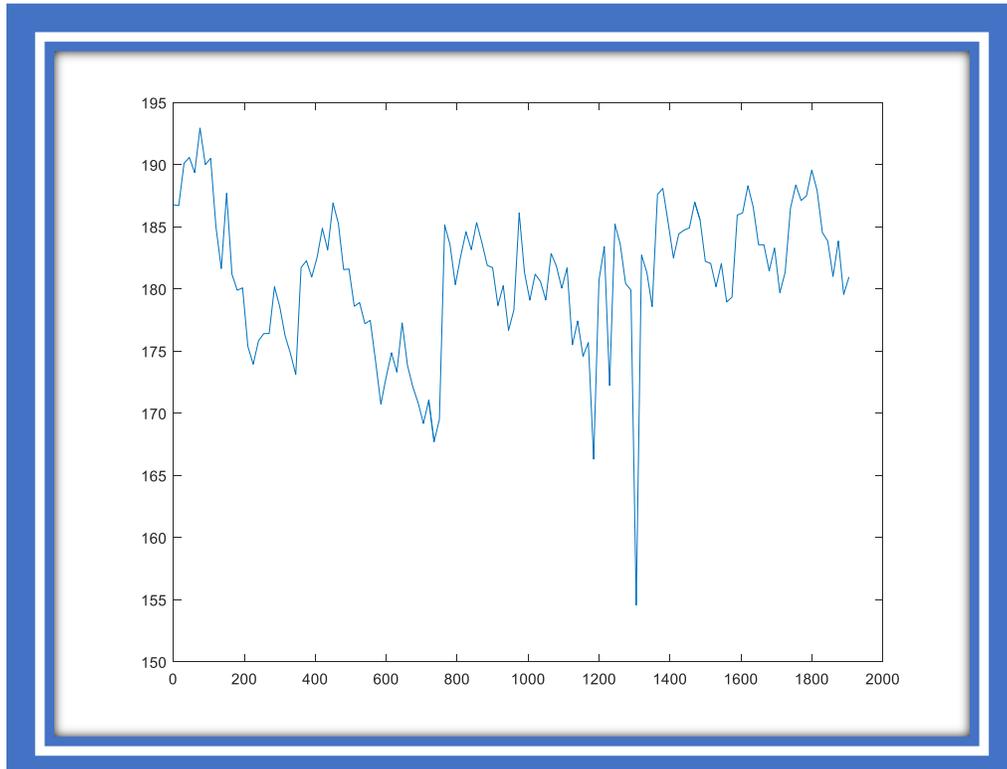


Gráfica 5.1. Calor útil de 3 mejores días de prueba

De los datos obtenidos en las tablas (4.4, 4.5, 4.6) se determinaron tanto el calor útil en el prototipo de colector como la eficiencia global térmica en los 3 mejores días. En la gráfica (5.1) observamos que, aunque los valores son diferentes muestran una tendencia parecida, que se ve de igual manera en la gráfica (5.2) con el valor de sus eficiencias que muestran un parecido razonable entre ellas.



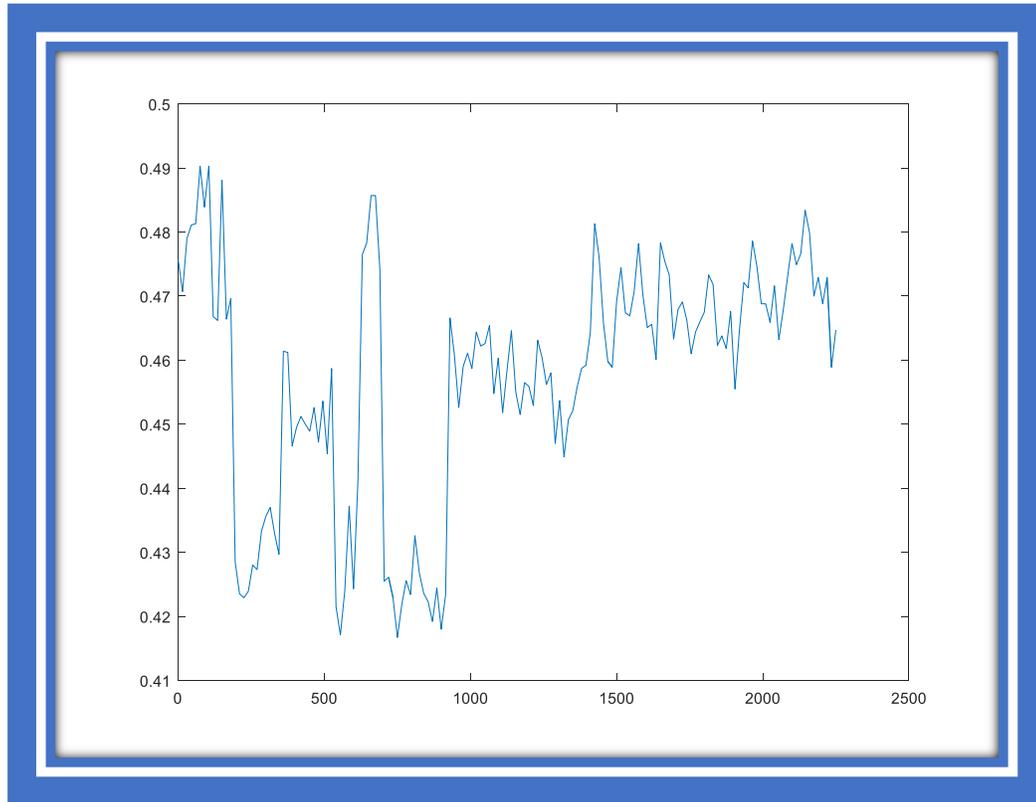
Gráfica 5.2. Eficiencia térmica global de 3 mejores días de prueba



Gráfica 5.3. Calor útil de todos los días de prueba

La grafica (5.1) muestra el comportamiento del calor útil ganado por el agua en el transcurso de 10 días de pruebas, que fueron realizadas entre los meses de Diciembre 2018 y Enero del 2019, entre las 12:00 hrs y las 16:00 hrs aproximadamente, ya que entre esas horas es cuando se alcanza la mayor irradiación solar. El calor útil oscila entre los 193 y 155 W, se puede ver que, aunque los días de prueba fueron variados (días nublados y soleados) el calor útil se mantiene constante, por lo que podemos inferir que la pintura absorbente-radiativa es un buen aislante.

En la gráfica (5.2) se muestra el comportamiento de las eficiencias del prototipo de colector solar, en los 10 días de prueba. Se puede observar en la gráfica como la eficiencia oscila entre el 0.49 y 0.41, y como al final de las lecturas se mantiene constante.



Gráfica 5.4. Eficiencia térmica global de todos los días de prueba

Fecha de la prueba	Calor útil promedio [W]	Eficiencia térmica global promedio
07/12/2018	187.09	0.4776
10/01/2019	177.29	0.4342
15/01/2019	182.42	0.4653
21/01/2019	172.80	0.4234
22/01/2019	181.84	0.4599
23/01/2019	179.77	0.4550
24/01/2019	166.83	0.4646
25/01/2019	177.40	0.4695
28/01/2019	183.65	0.4655
29/01/2019	183.97	0.4702
31/01/2019	185.05	0.4728

Tabla 5.7. Promedio de calor útil y eficiencia térmica global de todos los días de prueba

Al final de las mediciones se hizo un promedio de los datos obtenidos, en donde se puede apreciar cómo el sistema se mantiene estable en el transcurso de los días de prueba, ya que no existe mucha variación entre sus promedios de calor útil como en su eficiencia térmica global.

5.3 Análisis estadístico de los datos

Para corroborar que nuestro prototipo de colector solar plano en verdad estaba funcionando correctamente, se realizó un tratamiento estadístico con los datos obtenidos de los 10 días de prueba, estas fueron las pruebas que se realizaron:

Pruebas de normalidad

Los datos de todos los promedios de Temperatura, Calor del sistema y Eficiencia del sistema, son normales de acuerdo con la prueba de Kolmogorov para un nivel de significancia al $\alpha = 0.05$, adicionalmente, los datos de temperatura sin considerar su promedio, también es normal.

		Temperatura [°C]	Eficiencia Total del sistema	Calor total del sistema
N		24	24	20
Parámetros normales ^{a,b}	Media	45.21	.458021	180.359475
	Desviación típica	3.925	.0169454	5.5352186
Diferencias más extremas	Absoluta	.153	.217	.154
	Positiva	.153	.148	.096
	Negativa	-.098	-.217	-.154
Z de Kolmogorov-Smirnov		.751	1.064	.690
Sig. asintót. (bilateral)		.626	.207	.728

Tabla 5.8.1 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

- a. La distribución de contraste es la Normal.
- b. Se han calculado a partir de los datos.

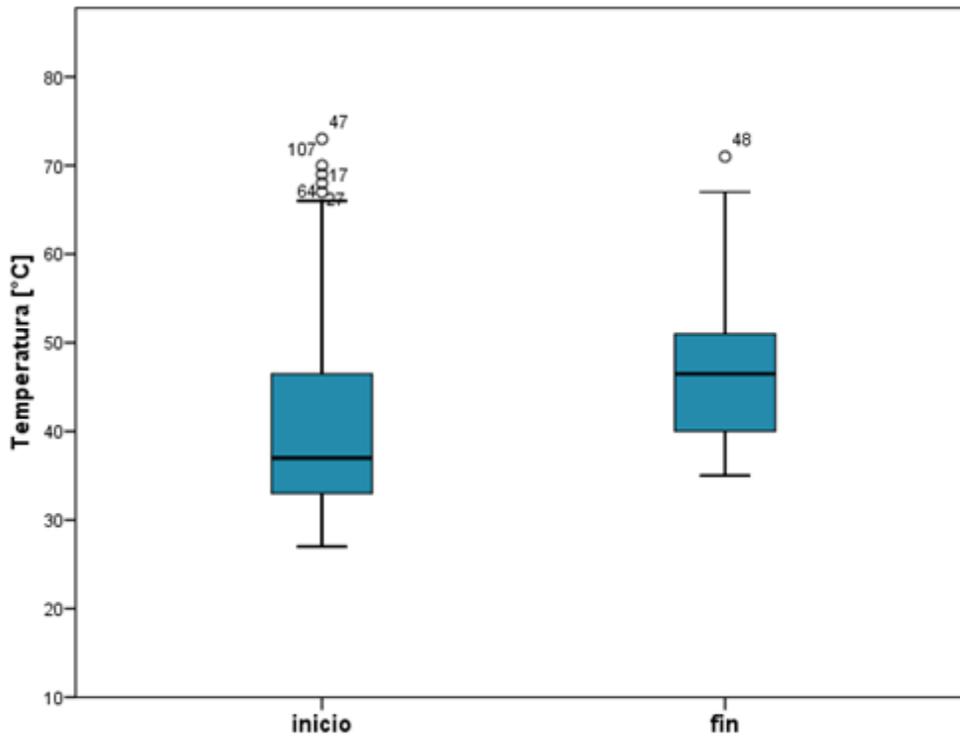
Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra		Temperatura [°C]
N		90
Parámetros normales ^{a,b}	Media	45.33
	Desviación típica	11.985
Z de Kolmogorov-Smirnov		1.103
Sig. asintót. (bilateral)		.175

Tabla 5.8.2 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

- a. La distribución de contraste es la Normal.
- b. Se han calculado a partir de los datos.

Temperatura

La prueba ANOVA indica que las temperaturas iniciales y finales de los sistemas son estadísticamente diferentes con un $p_{valor} = 0.036$ y un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La muestra cumple con los criterios de homogeneidad de varianza y normalidad en la distribución.



Gráfica 5.5. Temperatura inicial y final del experimento

Descriptivos

Temperatura [°C]	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
inicio	44	42.64	13.448	2.027	38.55	46.72	27	73
fin	46	47.91	9.868	1.455	44.98	50.84	35	71
Total	90	45.33	11.985	1.263	42.82	47.84	27	73

Tabla 5.9.1 Promedio de temperatura inicial y final con su desviación típica

ANOVA

Temperatura [°C]	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	626.166	1	626.166	4.532	.036
Intra-grupos	12157.834	88	138.157		
Total	12784.000	89			

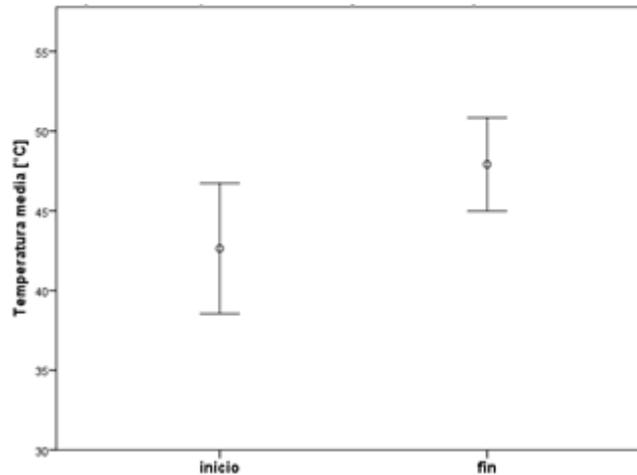
Tabla 5.9.2 Prueba ANOVA para temperatura

Pruebas robustas de igualdad de las medias

Temperatura [°C]	Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
Welch	4.472	1	78.740	.038

Tabla 5.9.3 Prueba robusta para temperatura

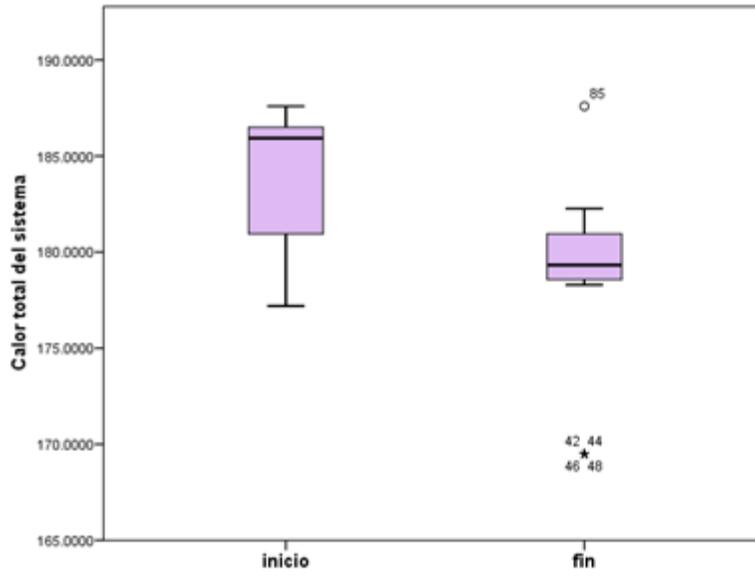
a. Distribuidos en F asintóticamente.



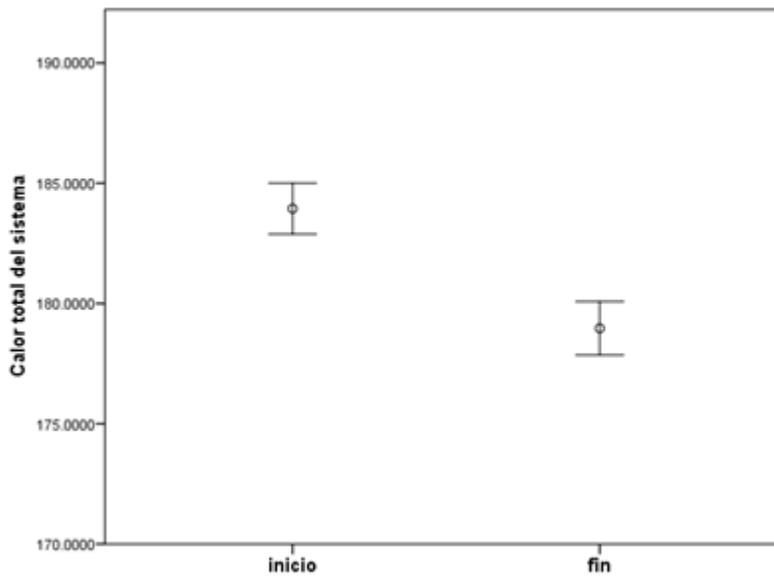
Gráfica 5.6. Grafica de barras de error con un intervalo de confianza al 95% para la temperatura inicial y final de las pruebas

Calor útil del sistema

La prueba ANOVA indica que el calor total del sistema en sus valores iniciales y finales son estadísticamente diferentes con un $p_{valor} \leq 0.000$ y un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La muestra cumple con los criterios de homogeneidad de varianzar y normalidad en la distribución.



Gráfica 5.7. Calor útil del sistema al inicio y final de las pruebas



Gráfica 5.8. Barras de error al 95% de confianza para el calor útil del sistema

Calor útil total del sistema

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
inicio	44	183.944707	3.4881743	.5258621	182.884205	185.005209	177.1906	187.5899
fin	46	178.968607	3.7522177	.5532343	177.854335	180.082878	169.4872	187.5899
Total	90	181.401367	4.3879533	.4625309	180.482328	182.320406	169.4872	187.5899

Tabla 5.10.1. Datos descriptivos del calor útil total

ANOVA

Calor útil total del sistema

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	556.860	1	556.860	42.363	.000
Intra-grupos	1156.758	88	13.145		
Total	1713.618	89			

Tabla 5.10.2. Prueba ANOVA para el calor útil total

Pruebas robustas de igualdad de las medias

Calor útil total del sistema

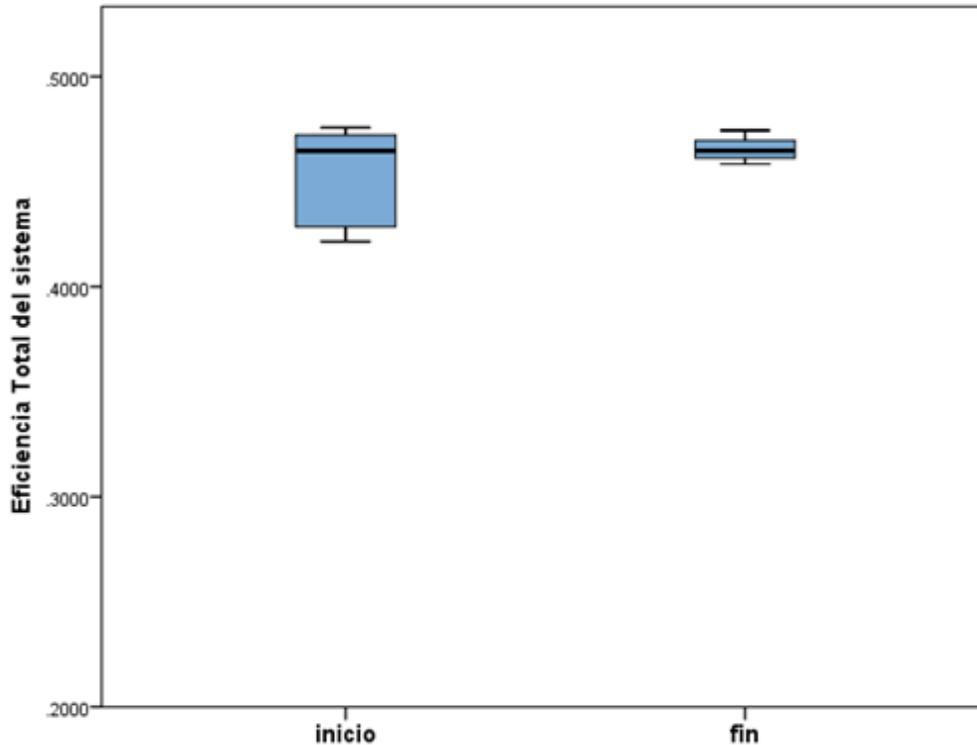
	Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
Welch	42.502	1	87.931	.000

Tabla 5.10.3. Prueba robusta de igualdad de las medias para el calor útil total

a. Distribuidos en F asintóticamente.

Eficiencia térmica global del sistema

La eficiencia térmica global del sistema al inicio y al final del experimento observa diferencias estadísticamente significativas con un $p_{valor} \leq 0.000$ y un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La muestra cumple con los criterios de homogeneidad de varianza y normalidad en la distribución.



Gráfica 5.9 Eficiencia térmica global al inicio y final de las pruebas

Descriptivos

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
inicio	54	.453752	.0198143	.0026964	.448344	.459160	.4215	.4757
Fin	51	.465733	.0054683	.0007657	.464195	.467271	.4584	.4744
Total	105	.459571	.0158322	.0015451	.456508	.462635	.4215	.4757

Tabla 5.11.1. Datos descriptivos de la eficiencia térmica global del sistema

Eficiencia térmica global del sistema

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
96.473	1	103	.000

Tabla 5.11.2. Prueba de homogeneidad de varianzas

ANOVA

Eficiencia térmica global del sistema

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	.004	1	.004	17.389	.000
Intra-grupos	.022	103	.000		
Total	.026	104			

Tabla 5.11.3. Prueba ANOVA

Conclusiones

Se logró construir el prototipo del colector solar plano, además se probó que en verdad funciona, ya que después del tratamiento estadístico de datos se corroboró que la temperatura, el calor útil y la eficiencia total del sistema sufren un cambio ascendente, desde el inicio de las pruebas y hasta el final de estas, sin importar las circunstancias del día (nublado o soleado), con lo que se puede decir que el sistema térmico funciona perfectamente.

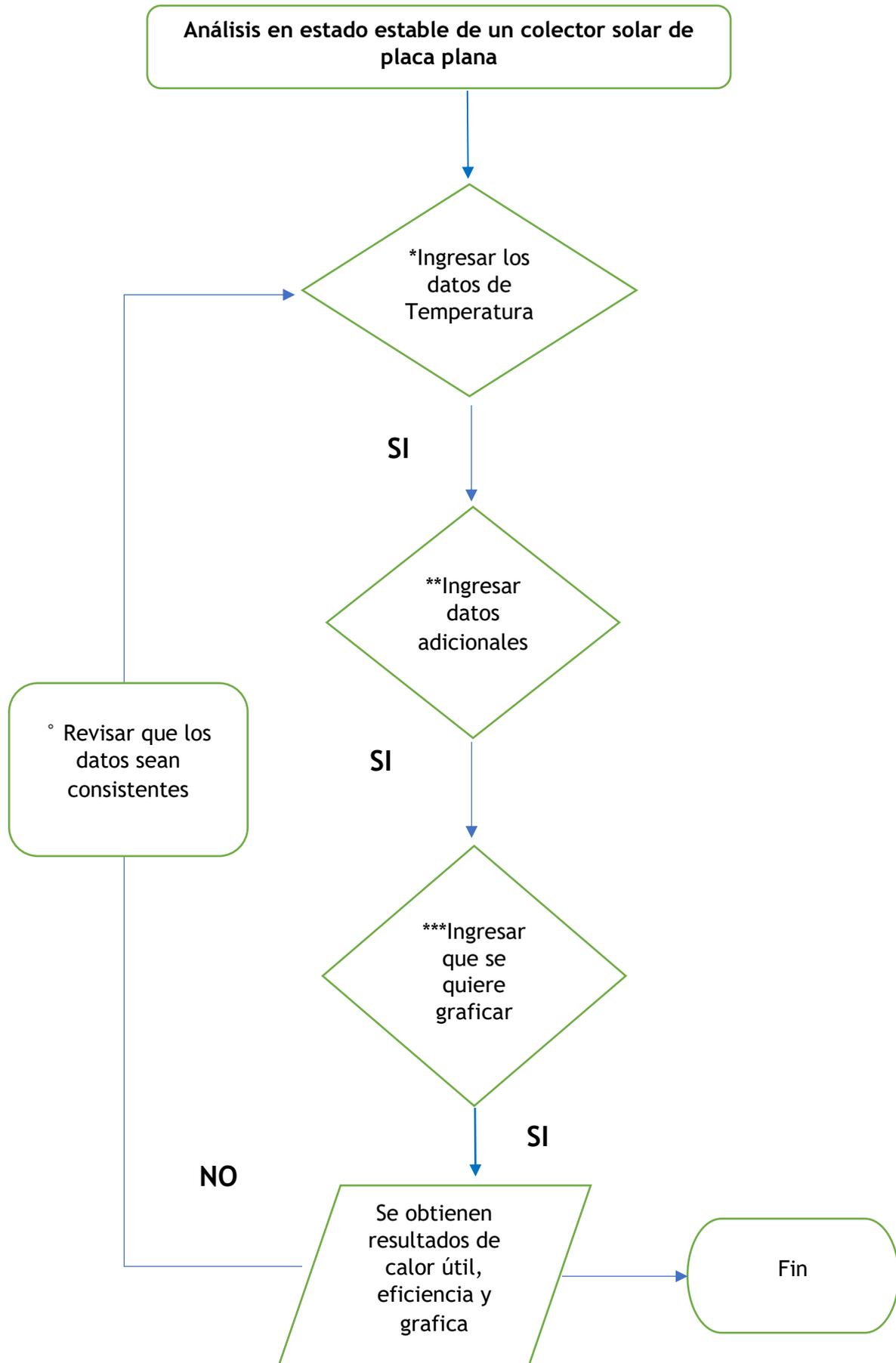
Además, se comprobó que la pintura absorbente-radiativa a partir de escoria de aceración es un buen recubrimiento en la placa absorbente de un colector solar, en primer lugar, con las pruebas realizadas con el solarímetro, en donde la pintura absorbente radiativa a base de escoria de aceración fue comparada con 3 materiales diferentes (material sintético, natural tipo II y cuerpo gris) que también pueden recubrir a una placa absorbente, mostrando en la mayoría de los casos un mejor desempeño por su buen comportamiento, ya que elevaba su temperatura en un lapso de tiempo corto y se mantenía constante, sin importar los meses en los cuales las pruebas fueron realizadas haciendo hincapié que en los meses en los cuales se realizaron las pruebas con la pintura a base de escoria la irradiancia solar es inferior a los demás.

Posteriormente se volvió a comprobar el buen desempeño de la pintura como recubrimiento de la placa absorbente con los datos obtenidos del prototipo de colector, ya que la eficiencia global total del sistema oscila entre el 40% y 49%, por lo que se puede inferir que si se construyera un colector solar casero con las medidas comerciales que oscilan los 240 litros se obtendría sin ningún problema una eficiencia entre el 20% y 25% la cual es la eficiencia que se maneja en el mercado para colectores con esa capacidad.

Con respecto a los costos, si se construyera un colector solar comercial con los materiales con los que se realizó el prototipo, la comparación con el costo que tienen los colectores solares comerciales para uso doméstico, disminuiría considerablemente, sin contar que muchas veces las piezas que se llegan a descomponer con frecuencia en este tipo de colectores comerciales son difíciles de conseguir, ya que la mayoría son importados o muchas veces si existen son muy caras, en cambio los materiales que se usaron para el prototipo no tienen costos tan elevados y son fáciles de conseguir. Además, si se considera la parte de mantenimiento es fácil poder realizarlo con el tipo de materiales que se utilizaron en el prototipo de colector ya que son fácilmente manipulables en comparación con los colectores comerciales. Lo cual ayudaría a la economía de los hogares que prefieran usar este tipo de sistemas en sus viviendas, debido a que disminuiría considerablemente este gasto que se realiza de manera constante.

Recomendaciones

- Utilizar calzado, ropa y equipo adecuado cuando se trabaje con el acero, cuando se tenga que soldar o cortar algún trozo de este.
- Al realizar los solarímetros cuidar que no existan fugas sellando perfectamente los corchos en los tubos de policarbonato con el silicón.
- Al ser recubiertos los tubos por la pintura dejar secar en la sombra.
- Lijar perfectamente los tubos antes de ser soldados.
- Ser cuidadosos a la hora de soldar los codos en el prototipo de colector solar.
- Utilizar en todo momento guantes cuando se manipule la fibra de vidrio.
- Ser sumamente cuidadosos cuando se coloque el vidrio en el prototipo de colector solar y cerciorarse que esté limpio de ambos lados a la hora de colocarlo.
- Cuidar que no existan fugas en el prototipo de colector y si llegara a presentarse arreglarlas de inmediato.
- Llevar un sistema estricto en los tiempos en los que se recogerán los datos ya que es de suma importancia para el análisis estadístico.



*Ingresar los datos de temperatura:

t: tiempo de prueba (intervalos de 15 min)

TEv=Temperatura inferior del tanque [°C]

Tiv=Temperatura superior del tanque [°C]

TP= Temperatura de la placa absorbadora [K]

Tv=Temperatura de vidrio [K]

Ta= Temperatura ambiente [K]

Ts= Temperatura de salida del colector [°C]

Te= Temperatura de entrada del colector [°C]

**Los demás datos permanecen constantes, aunque cambiarían si se utilizan materiales distintos o se modifica el prototipo en tamaño, arreglo de tubos en la placa, etc.

***Ingresar que constantes se quieren graficar: por ejemplo, al graficar tiempo vs calor útil

plot (t, Qu)

° Para que los datos sean consistentes deben ser de igual tamaño las listas de todas las variables de temperatura y tiempo (deben tener la misma cantidad de datos por ejemplo si en la variable t que es el tiempo ingresamos 5 datos, igualmente la variable TP que es la temperatura de la placa absorbadora debe tener 5 datos, al igual que Tv, Ta, Ts, etc.).

Código MatLab para el análisis en estado estable de un colector solar de placa plana

```

disp('La terminación p, como Tairip, se refiere al procedimiento de
cálculo de Temperatura de Vidrio, de acuerdo a la propuesta de Duffie y
Beckman')
disp('La temperatura cero corresponde a las 10:15 de la mañana')
t=[0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 210 225 240 255]'
TEv=[32 38 45 47 48 52 55 56 59 59 59 62 62 60 52 48 42 33]'
TIv=[ 44 39 45 48 50 54 58 59 62 64 64 66 65 64 57 50 46 31]'
TP=[321.15 327.15 335.82 339.15 343.15 348.15 354.82 358.15 359.82 361.48
363.15...
365.15 364.82 361.82 352.82 341.48 335.15 324.48]'
Tv=[308.1622 314.0377 320.4956 322.9978 325.2738 326.9761 331.2212
334.6000 337.7696...
338.0731 337.7138 339.5763 339.2817 337.7838 331.5618 323.4723 317.9235
311.0559]'
Ta=[298.15 302.15 304.15 305.00 305.15 303.15 303.15 306.15 311.05 309.25
305.95 307.35...
307.15 308.15 306.95 304.75 301.15 300.65]'
L=0.25;g=9.81;rhoair=1.1993;ep=0.92;ev=0.75
TVi=[TIv+273.15]
TVE=[TEv+273.15]
TVP=[(TVi+TVE)./2]
Tair=(TP+Tv)/2.
Tairp=(TP+TVP)/2.
beta=1./(Tair)
betap=1./(Tairp)
betaa=1./(Ta)
Tcie=0.0552*(Ta).^(3/2)
Kairi=2.47663035E-17*(Tair).^5.-1.066657E-13*(Tair).^4.+1.73550642E-
10.*(Tair).^3....
-1.4815235E-07*(Tair).^2.+1.2598485E-04*(Tair)-2.276501E-03
Kairip=2.47663035E-17*(Tairp).^5.-1.066657E-13*(Tairp).^4.+1.73550642E-
10.*(Tairp).^3....
-1.4815235E-07*(Tairp).^2.+1.2598485E-04*(Tairp)-2.276501E-03
CPairi=(0.1077024E-12*(Tair).^4.-0.4970786E-09*(Tair).^3.+0.7816818E-
06*(Tair).^2....
-0.284887E-03*(Tair)+0.103409E01)*1000
CPairip=(0.1077024E-12*(Tairp).^4.-0.4970786E-09*(Tairp).^3.+0.7816818E-
06*(Tairp).^2....
-0.284887E-03*(Tairp)+0.103409E01)*1000
Visairi=(-5.7971299E-11*(Tair).^4.+1.2349703E-07*(Tair).^3.-1.17635575E-
04*(Tair).^2....
+9.080125E-02*(Tair)-9.8601E-01)*1.0E-06
Visairip=(-5.7971299E-11*(Tairp).^4.+1.2349703E-07*(Tairp).^3.-
1.17635575E-04*(Tairp).^2....
+9.080125E-02*(Tairp)-9.8601E-01)*1.0E-06
Gri=((L)^3.*(rhoair)^2.*(g)*(TP-Tv).*(beta))./((Visairi).^2.)
Grip=((L)^3.*(rhoair)^2.*(g)*(TP-TVP).*(betap))./((Visairip).^2.)
Pri=CPairi.*Visairi./Kairi
Prip=CPairip.*Visairip./Kairip
Rai=Gri.*Pri
Raip=Grip.*Prip

```

```

Nui=0.15*(Rai).^ (1/3)
Nuip=0.15*(Raip).^ (1/3)
hcpv=Nui.*Kairi./L
hcpvp=Nuip.*Kairip./L
hrpv=5.67E-08*((TP).^2.+(Tv).^2.)* (TP+Tv)/ ((1/ep)+(1/ev)-1)
hrvpv=5.67E-08*((TP).^2.+(TVP).^2.)* (TP+TVP)/ ((1/ep)+(1/ev)-1)
Kaira=2.47663035E-17*(Ta).^5.-1.066657E-13*(Ta).^4.+1.73550642E-
10.*(Ta).^3....
-1.4815235E-07*(Ta).^2.+1.2598485E-04*(Ta)-2.276501E-03
CPaira=(0.1077024E-12*(Ta).^4.-0.4970786E-09*(Ta).^3.+0.7816818E-
06*(Ta).^2....
-0.284887E-03*(Ta)+0.103409E01)*1000
Visaira=(-5.7971299E-11*(Ta).^4.+1.2349703E-07*(Ta).^3.-1.17635575E-
04*(Ta).^2....
+9.080125E-02*(Ta)-9.8601E-01)*1.0E-06
Gr=(L)^3.*(rhoair)^2.*(g)*(0.9397)*(Tv-Ta).*(betaa))./((Visaira).^2.)
Grp=(L)^3.*(rhoair)^2.*(g)*(0.9397)*(TVP-Ta).*(betaa))./((Visaira).^2.)
Pr=CPaira.*Visaira./Kaira
Ra=Gr.*Pr
Rap=Grp.*Pr
Nul=0.387*Ra.^ (1/6);
Nulp=0.387*Rap.^ (1/6);
Nu2=(1+(0.492./Pr).^ (9/16)).^ (8/27);
Nu=(0.825+Nul./Nu2).^2
Nup=(0.825+Nulp./Nu2).^2
hcva=Nu.*Kaira./L
hcvap=Nup.*Kairip./L
hrva=(5.67E-08*ev*((Tv).^4.-(Tcie).^4.))./(Tv-Ta)
hrvap=(5.67E-08*ev*((TVP).^4.-(Tcie).^4.))./(TVP-Ta)
Tvi=(TP.*(hrpv+hcpv)+Ta.*(hrva+hcva))./(hrpv+hcpv+hrva+hcva)
Tvip=(TP.*(hrvpv+hcpvp)+Ta.*(hrvap+hcvap))./(hrvpv+hcpvp+hrvap+hcvap)
Ts=[311.15 312.15 313.15 314.15 315.15 317.15 321.15 323.15 324.15 325.15
329.15 331.15...
331.15 332.15 331.15 331.15 328.15 328.15]'
Te=[298.15 302.15 304.15 305.15 306.15 309.15 313.15 315.15 318.15 321.15
323.15 326.15...
327.15 330.15 329.15 325.15 320.15 315.15]'
fm=2.95E-05;Dt=0.0127;Pr=1
Tma=(Ts+Te)/2
Ka=(-9.73219E-11*(Tma).^6.+2.01085E-07*(Tma).^5.-1.720604E-
04*(Tma).^4.+7.80478E-02*(Tma).^3....
-19.80407*(Tma).^2.+2.66844E03*(Tma)-1.48848e05)*1.0E-03
rhoa=-6.2875E-11*(Tma).^6.+1.28262E-07*(Tma).^5.-1.08797E-
04*(Tma).^4.+4.91235E-02*(Tma).^3....
-12.4562*(Tma).^2.+1.682296E03*(Tma)-9.354728E04
CPa=2.3144E-10*(Tma).^6.-4.9482E-07*(Tma).^5.+4.39438E-04*(Tma).^4.-
0.2074977*(Tma).^3....
+54.955801*(Tma).^2.-7.74264E03*(Tma)+4.576429E05
Visa=(2.4587E-09*(Tma).^6.-5.117517E-06*(Tma).^5.+4.43703E-03*(Tma).^4.-
2.051911*(Tma).^3....
+534.05264*(Tma).^2.-7.422142E04*(Tma)+4.307399E06)*1.0E-06
Re=(4*rhoa*fm)./(pi*Dt*Visa)
Nu=0.0015*(Re).^0.75*(Pr).^ (1/3)
NU=3.7+[ (0.0534)*(Re*Pr*Dt/L).^ (1.15)./(1+(0.0335)*(Re*Pr*Dt/L).^ (0.82))]
hf=Nu.*Ka./Dt

```

```

hfGRC=NU.*Ka./Dt
KC=[0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312
0.9312 0.9312...
0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312 0.9312]'
esKp=[0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117
0.00117 0.00117...
0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117 0.00117]'
W=0.05;Dt=0.0127;fm=2.95E-02;Ac=0.486;KP=1.17;esp=0.001
talfa=0.8;G=800;Lv=0.003
UT1=(hrpv+hcpv)
UT1p=(hrvp+hcpvp)
UT2=(hrva+hcva)
UT2p=(hrvap+hcvap)
UT=1./((1./UT1)+(1./UT2))
UTp=1./((1./UT1p)+(1./UT2p))
UL=(UT+KC)
ULp=(UTp+KC)
m=[UL./esKp].^(1/2)
mp=[ULp./esKp].^(1/2)
F=[tanh(m.*(W-Dt)/2)]./[m.*(W-Dt)/2]
Fpp=[tanh(mp.*(W-Dt)/2)]./[mp.*(W-Dt)/2]
Fp1=1./(UL.*(Dt+F.*(W-Dt)))
Fpp1=1./(ULp.*(Dt+Fpp.*(W-Dt)))
Fp2=1./(pi*Dt*hf)
Fp2GRC=1./(pi*Dt*hfGRC)
Fp=(1./UL)./[W*(Fp1+Fp2)]
Fpp=(1./ULp)./[W*(Fpp1+Fpp2)]
FpGRC=(1./UL)./[W*(Fp1+Fp2GRC)]
Ep1=(0.4826*(-UL).*Fp)./(0.029*CPa)
Ep1p=(0.4826*(-ULp).*Fpp)./(0.029*CPa)
Exp2=(1-exp(Ep1))
Exp2p=(1-exp(Ep1p))
FR1=(0.0295*CPa.)/(0.486*UL)
FR1p=(0.0295*CPa.)/(0.486*ULp)
FR=FR1.*Exp2
FRp=FR1p.*Exp2p
Qu=(0.486)*FR.*[G*talfa-UT.*(Te-Ta)]
Qup=(0.486)*FRp.*[G*talfa-UTp.*(Te-Ta)]
EFC=FR.*[talfa-UL.*(Te-Ta)./G]*100
EFCp=FRp.*[talfa-ULp.*(Te-Ta)./G]*100
Efi=FR.*talfa-(FR.*UL.*(Te-Ta)./G)
EfiP=FRp.*talfa-(FRp.*ULp.*(Te-Ta)./G)
plot(t,Qu,t,UL)

```

Referencias bibliográficas

1. S. Escoda. (2017) Libro Blanco de las Energías Renovables, España: Editorial. Salvador Escoda S.A
2. P. Puig & M. Jofra. (2006) Energías renovables para todos. Energía solar térmica, España: Editorial. Haya comunicación
3. Julieta C. Schallenberg et al. (2008) Energías renovables y eficiencia energética, España: Editorial Instituto tecnológica de Canarias
4. F. Appavou & A. Brown. (2017) Puntos destacados del reporte de REN 21 sobre la situación mundial de las energías renovables 2017 www.ren21.net/GSR y www.ren21.net/GFR
5. Renewables 2017 Global status report. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf
6. C. Robles & O. Rodríguez (2018) Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. Revista espacios Vol.39 (No 34)
7. Reporte de avances de energías limpias. (2018) primer semestre, SENER
8. Sistemas de concentración de energía solar, Alfredo Peña Díaz, Colombia
9. O. García & I. Pilatowsky. (2017) Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial. Instituto de energías renovables, Editorial: Instituto de energías renovables UNAM, México
10. John A. Duffie & William A. Beckman (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. Editorial: John Wiley & Sons, Inc, Fourth Edition Canada
11. Geyer Michael. (2005) Torres, Discos, colectores cilindro parabólicos, Editorial: Solar Paces
12. F. Kreith & D.Y. Goswami. (2016) Handbook of energy efficiency and renewable energy. Editorial: Taylor & Francis, second edition
13. Wang, W. & Crescent dunes. (2014) Project overview. Solar reserve
14. S. Guevara. (2013) Estimación de la radiación solar, Editorial: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Perú
15. Sara Andrés Vizán et al. (2010). Valoración tecno ambiental de las escorias de acería mediante análisis dinámico de ciclo de vida, Editorial: Universidad de Oviedo, España
16. Calvo Tapia & Montesinos M. (2012) Desarrollo de una formulación absorbente-radiativa para usarse en colectores térmicos solares, UNAM. México
17. Foronuclear.org (International Atomic Energy Agency)
18. D.M. Liverman, M. E. Hanson, B. J. Brown, R. W. Merideth Jr, (1988) Global sustainability: toward measurement. Environ-Manage
19. IEA, 2008 (www.worldenergyoutlook.org)
20. Mulas et al., 2005 (tinyurl.com/psuerm)

21. Mapa Tecnológico energía solar térmica
22. Ari Rabl (1985). Active solar collectors and their applications, Editorial: Oxford university press, EUA
23. Soteris A. Kalogirou (2014) Solar energy engineering, second edition, Editorial: Elsevier, UK