



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS EVACUADOS PARA AIRE DE SECADO

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

NOE ARI FLORES MONTIJO

Hermosillo, Sonora

Agosto, 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

AGRADECIMIENTO

A mi director de tesis, Dr. Rafel Cabanillas, por brindarme el conocimiento, brindarme la confianza y por todas las enseñanzas en la elaboración de este trabajo y a lo largo de mi trayectoria académica universitaria. A mis sinodales por hacerme notar mis aciertos y errores para poder lograr el objetivo.

A mi compañera Alejandra Guadalupe Bringas Gutiérrez por su invaluable colaboración en el desarrollo de la primera parte de este proyecto.

A la Universidad de Sonora por proporcionarme los conocimientos necesarios para desarrollarme profesionalmente y por la oportunidad de vivir diferentes experiencias.

DEDICATORIA

A mis padres que son el pilar fundamental de lo que soy, por todo su apoyo y por motivarme a seguir adelante.

A mis hermanos por su ayuda constante en este tiempo de mi formación. A mi novia por su apoyo incondicional.

A mis amigos con quienes compartí más de 4 años de carrera universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE DE CONTENIDO | v |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABLAS | x |
| NOMENCLATURA | xi |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivos | 6 |
| Objetivos específicos:..... | 6 |
| Metodología..... | 6 |
| CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| Situación de las Energías Renovables en el Mundo..... | 8 |
| Situación de las Energías Renovables en México..... | 9 |
| Energía Solar Fotovoltaica y Térmica | 10 |
| Necesidad de Calor | 13 |
| Dispositivos solares térmicos..... | 14 |
| Secado..... | 16 |
| Clasificación de los secadores | 16 |
| Tipos de secadores..... | 16 |
| Temperatura del aire para secado | 19 |
| Tubos Evacuados..... | 20 |
| Eficiencia de los Colectores Solares | 20 |
| Calentadores de aire de tubos evacuados | 22 |
| CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DEL SET EXPERIMENTAL | 24 |

| | |
|--|-----------|
| Instrumentos de medición | 26 |
| Cálculo de parámetros de evaluación..... | 29 |
| Metodología..... | 32 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS | 33 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES..... | 45 |
| Recomendaciones..... | 46 |
| CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |
| ANEXO A..... | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de la irradiancia global horizontal mundial (Global Solar Atlas, 2018)..... | 3 |
| Figura 2. Sección Transversal de un Tubo Evacuado..... | 5 |
| Figura 3. Tasas de Crecimiento Promedio Anuales de las Capacidades de las Energías Renovables y Producción de Biocombustibles, Final-2010 al Final-2015 (REN21, 2016). | 8 |
| Figura 4. Capacidad Global de Energía Solar Fotovoltaica y Adiciones Anuales, 2005-2015 (REN21, 2016). | 11 |
| Figura 5. Capacidad Global de la Energía Solar Térmica de Concentración, por País/Región, 2005-2015 (REN21, 2016)..... | 12 |
| Figura 6. Capacidad Global de Colectores Solares de Calentamiento de Agua, 2005-2015 (REN21, 2016). | 13 |
| Figura 7. Calor en el Consumo Final Total Global, 2015 (Collier, 2018). | 14 |
| Figura 8. Principio de Trabajo del Secador Solar Directo (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009). | 17 |
| Figura 9. Principio de Funcionamiento del Sistema de Secado Solar Indirecto (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009). | 18 |
| Figura 10. Eficiencias de varios colectores de líquidos (Kalogirou, 2004)..... | 21 |
| Figura 11. Curvas de eficiencia instantánea para varios tipos de colectores solares (Sustainability Victoria, 2010). | 21 |
| Figura 12. Diagrama de la configuración experimental del colector solar. | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 13. Esquema de un Tubo Evacuado. | 25 |
| Figura 14. Diseño del Secador: 1) Tubo de Polipropileno; 2) Tubos Evacuados; 3) Tubo de Acero Inoxidable; 4) Tubos Conduit de Pared Delgada; 5) Superficie Reflectante; 6) Soportes; 7) Entrada de Aire; 8) Salida de Aire | 26 |
| Figura 15. Termopar tipo K..... | 27 |
| Figura 16. Piranómetro Campbell Scientific CMP11. | 27 |
| Figura 17. Esquema del Colector con los Sensores de Medición. | 27 |
| Figura 18. Anemómetro de alambre caliente Extech 407119A. | 28 |
| Figura 19. Configuración Experimental del Colector Solar..... | 28 |
| Figura 20. Calor específico en función de la temperatura de 27°C a 102°C (Engineering ToolBox, 2005)..... | 31 |
| Figura 21. Densidad en función de la temperatura de 0 a 100°C (Coronel Toro & Perez-Lombard Martin de Oliva, 2016)..... | 31 |
| Figura 22. Sección transversal de la tubería de salida del colector solar mostrando los puntos de medición de la velocidad..... | 32 |
| Figura 23. Temperaturas de Entrada, de Salida, Diferencia de Temperaturas y Radiación Presentadas a Flujo Constante de Aire el día 1/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h..... | 35 |
| Figura 24. Temperaturas de Entrada, de Salida, Diferencia de Temperaturas y Radiación Presentadas a Flujo Constante de Aire el día 3/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h..... | 35 |
| Figura 25. Cambio de la Eficiencia Instantánea y la Radiación con el Tiempo el día 3/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 26. Variación del Flujo Másico con respecto al voltaje..... | 37 |
| Figura 27. Temperaturas de entrada, de salida, diferencia de temperaturas y radiación presentadas a flujo constante de aire el día 10/Julio/2017 con un flujo de 12.5 kg/h. | 39 |
| Figura 28. Temperaturas de entrada, de salida, diferencia de temperaturas y radiación presentadas a flujo constante de aire el día 13/Julio/2017 con un flujo de 30.1 kg/h. | 39 |
| Figura 29. Cambio de la Eficiencia Instantánea y la Radiación con el Tiempo el día 7/Julio/2017 con un flujo de 24.4 kg/h..... | 41 |
| Figura 30. Eficiencia del sistema contra el flujo másico en un lapso de media hora al medio día. | 41 |
| Figura 31. Eficiencia global del sistema contra el flujo másico..... | 42 |
| Figura 32. Variación de las temperaturas de salida del aire con respecto al cambio del flujo másico..... | 43 |
| Figura 33. Eficiencia Global del Colector Solar. | 44 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Propiedades Térmicas del Polipropileno (Industrias JQ, 2016). | 25 |
| Tabla 2. Temperaturas del Aire de Entrada y de Salida, Diferencias de Temperatura, Radiación Total Recibida por día, Calor Absorbido por día y Eficiencia..... | 33 |
| Tabla 3. Flujo Volumétrico y Másico para cada voltaje utilizado..... | 36 |
| Tabla 4. Temperaturas del aire de entrada, de salida, temperatura promedio del aire, gradiente de temperatura, calor absorbido y eficiencia a diferentes flujos másicos..... | 38 |
| Tabla 5. Eficiencia global por día a diferentes flujos másicos..... | 42 |
| Tabla 6. Temperatura máxima soportada de diferentes cultivos (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009). | 50 |
| Tabla 7. Propiedades del aire seco a presión atmosférica (Coronel Toro & Perez-Lombard Martin de Oliva, 2016)..... | 51 |
| Tabla 8. Calor específico del aire a diferentes temperaturas (Engineering ToolBox, 2005)..... | 52 |

NOMENCLATURA

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| % | Porcentaje |
| °C | Grados centígrados |
| W | Watts |
| m ² | Metros cuadrados |
| MW | Mega watts |
| GW | Giga watts |
| kWh | Kilo watts hora |
| GWh | Giga watts hora |
| GWth | Giga Watts térmicos |
| Kg/h | Kilogramos por hora |
| Kg/m ³ | Kilogramos por metro cúbico |
| m | Metro |
| cm | Centímetro |
| hp | Caballo de fuerza |
| V | Volt |
| J | Joule |
| MJ | Mega joule |
| m ³ | Flujo másico |

| | |
|------------|--|
| C_p | Calor específico |
| ΔT | Diferencia de temperatura |
| T_{out} | Temperatura de salida |
| T_{in} | Temperatura de entrada |
| Q | Flujo de calor |
| Q_u | Calor útil |
| E | Energía total recibida |
| I | Irradiancia |
| A | Área |
| η | Eficiencia |
| η_0 | Eficiencia sin pérdidas de calor |
| a_1, a_2 | Coeficientes que describen las pérdidas de calor |
| T_m | Temperatura promedio |

RESUMEN

Se diseñó y desarrolló un colector solar de tubos evacuados con el propósito de calentar aire a temperatura ambiente para usarlo en procesos de secado. El presente estudio fue realizado para evaluar la eficiencia térmica instantánea y global para el equipo. Para lograrlo se midieron las temperaturas del aire de entrada y de salida del colector, también el flujo másico y la irradiancia a lo largo del día. Con estos datos se calculó la cantidad de calor absorbida por el fluido, se obtuvo la eficiencia instantánea usando los valores de la radiación solar global en el mismo plano del colector y posteriormente se determinaron las eficiencias globales. El dispositivo consiste en un tubo de polipropileno de 0.70 m. de largo donde se encuentran colocados 5 tubos evacuados, cuyas medidas son de 1.80 m. de largo, el diámetro del tubo de vidrio exterior es de 0.0582 m. y el diámetro del tubo absorbedor interior es de 0.0451 m., presentando un área efectiva de 0.515 m². Mediante un arreglo estructural compuesto por un conducto de acero inoxidable con tubería Conduit de pared delgada se inyecta aire dentro de cada uno de los tubos evacuados. El estudio se realizó durante varios días para obtener las curvas de comportamiento térmico del colector bajo diversos flujos de aire. En una primera etapa se mantuvo un flujo constante. Se obtuvieron incrementos de temperatura de hasta 45°C con temperaturas de salida de 80°C y eficiencias de alrededor del 60%. En una segunda etapa se varió el flujo másico y se observaron incrementos de temperatura entre la entrada y la salida del colector de 30°C a 50°C alcanzando temperaturas máximas de salida de hasta 90°C, se calcularon eficiencias de 40% para las altas temperaturas de operación y valores de 60% para incrementos pequeños. De acuerdo con las tendencias lineales presentadas en el incremento de temperatura es posible diseñar sencillos sistemas de control de temperatura para secadores instrumentados.

ABSTRACT

A solar collector of evacuated tubes was designed and developed for heating air from room temperature for use in drying processes. The present study was carried out to evaluate the instantaneous and global thermal efficiency for the equipment. To achieve this, the inlet and outlet air temperatures of the collector were measured, as well as the mass flow and the irradiance throughout the day. With this data the amount of heat absorbed by the fluid was calculated, instantaneous efficiency was obtained using the values of the global solar radiation in the same plane of the collector and later the global efficiencies were determined. The device consists of a polypropylene tube of 0.70 m. long where 5 evacuated tubes are placed, whose measures are 1.80 m. long, the diameter of the outer glass tube is 0.0582 m. and the diameter of the inner absorber tube is 0.0451 m., presenting an effective area of 0.515 m². Air is injected into each of the evacuated tubes through a structural arrangement consisting of a stainless-steel duct with thin-walled Conduit pipe. The study was developed over several days to obtain the thermal behavior curves of the collector under various air flows. In a first stage, a constant flow was maintained. Temperature increases of up to 45°C were obtained with outlet temperatures of 80°C and efficiencies of around 60%. In a second stage, the mass flow was varied, and temperature increases were observed between the inlet and outlet of the collector from 30°C to 50°C, reaching maximum outlet temperatures of up to 90°C, efficiencies of 40% were calculated for the high operating temperatures and 60% values for small increments. It is possible to design simple temperature control systems for instrumented dryers according to the linear tendencies presented in the temperature increase.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis toma como punto de partida la búsqueda de alternativas para obtener energía calorífica y su posterior utilización como en la calefacción para el hogar y comercial, calentamiento para uso industrial, secado, entre otros.

Para llevar a cabo estas actividades, comúnmente se utiliza el calentamiento por medio de la quema de combustibles o electricidad, resultando en una demanda de este tipo de energía cada vez mayor. Aquí se presenta una forma alterna de calentamiento mediante energía solar, aprovechando esa energía de manera concentrada y transferida a un medio de calentamiento, que regularmente se trata de un fluido.

Hoy en día, la necesidad energética es cada vez mayor, el uso de la energía está en constante aumento, por lo que se busca la forma de cumplir con el requerimiento. Para hacerlo se han buscado e ideado diferentes formas de obtenerla, esto va desde el uso de leña como fuente de calor, hasta las múltiples formas de producción de energía eléctrica.

Con el descubrimiento del petróleo se abrió una gran ventana de desarrollos científicos y tecnológicos, tanto así, que la mayoría de los avances que se realizaron estaban basados en este combustible fósil. Al ser una sustancia multivariable con la que se pueden obtener miles de productos derivados se generó una gran dependencia de este recurso.

El sector de la energía fue uno de los más beneficiados al contar con varios productos para su aprovechamiento. Se trata de los combustibles, como el combustóleo, el keroseno, el diésel y la gasolina, principalmente utilizados para el transporte y la generación de energía eléctrica. Otro combustible que se le ha encontrado utilidad en las últimas décadas para producir energía es el gas natural.

Estos recursos son desde hace tiempo la base sólida de la producción mundial de energía, sin embargo, no son los únicos. Ante la creciente contaminación ambiental y los problemas que ha traído consigo la utilización de los combustibles fósiles, la humanidad ha buscado la forma de producir energía mediante diferentes alternativas.

Se les conoce como fuentes renovables de energía a cualquier fuente natural que tenga como características principales que se considere como una fuente inagotable debido a la gran cantidad de energía que posee, o que tenga la capacidad de regenerarse por medios naturales. Algunos ejemplos de ello son las energías hidroeléctrica, mareomotriz y undimotriz que aprovechan el movimiento del agua en ríos, mares y océanos; la energía eólica que se basa en el movimiento del viento; la energía de biomasa y biocombustibles, que hace uso de materia orgánica; y la energía solar que funciona a través de la radiación del sol, siendo esta última la de interés para la presente investigación (Romero, 2012).

La energía solar es un tipo de energía renovable, se obtiene debido a la radiación electromagnética emitida por el sol. A nuestro planeta llega esta energía, y del total recibido, una parte es reflejada hacia el espacio exterior, lo restante ingresa al planeta, de la cual una fracción es absorbida por todas las capas y gases que conforman la atmósfera. Esa cantidad de energía que llega a la superficie terrestre se le conoce como irradiancia y contabiliza la cantidad de watts por cada metro cuadrado recibidos. La intensidad (Fig. 1) varía dependiendo la ubicación geográfica, la hora y las condiciones climáticas. En algunas zonas en un día normal en buenas condiciones y con cielo despejado se pueden obtener valores de hasta 1000 W/m^2 (Lorente, n.d.).

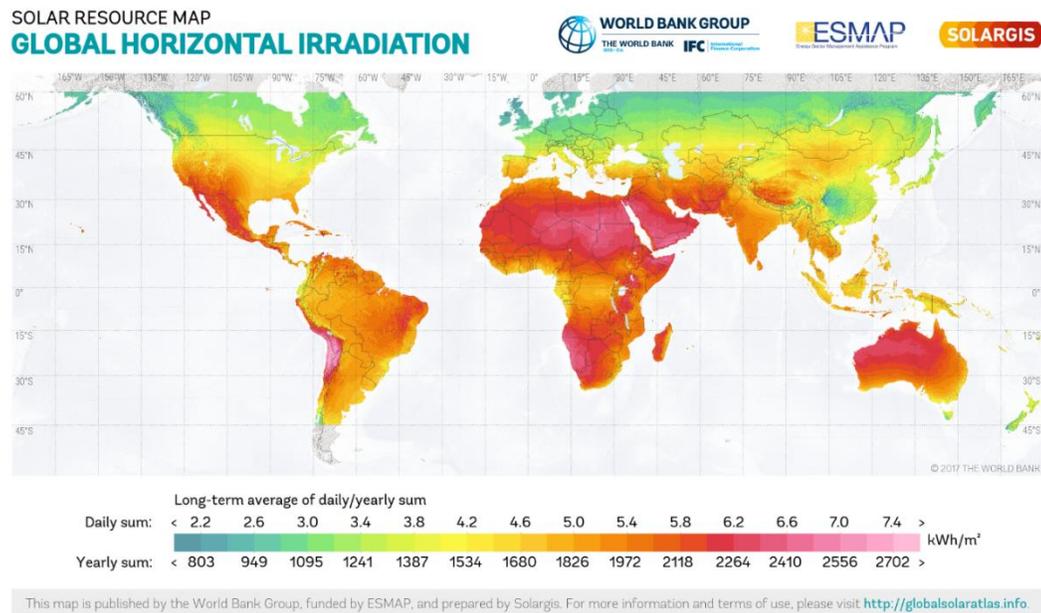


Figura 1. Mapa de la irradiancia global horizontal mundial (Global Solar Atlas, 2018).

La energía solar se puede utilizar de dos formas, en energía fotovoltaica y en energía fototérmica. La primera de ellas se basa en el efecto fotoeléctrico para producir electricidad por medio de los paneles fotovoltaicos los cuales cuentan con una eficiencia promedio del 15% (SolEnergy, 2010).

La energía fototérmica se fundamenta en que la radiación solar se transforma en calor. Generalmente se transfiere a un medio, normalmente un fluido como agua, aire, aceites sintéticos, entre otros.

La obtención de calor tiene diferentes aplicaciones que van desde aspectos sencillos hasta procesos industriales complejos. Este tipo de actividades funcionan a través de suministrarles energía, que en su mayoría proviene la quema de combustibles o mediante energía eléctrica.

El utilizar la energía proveniente del sol tiene sus ventajas. Al no depender de algún combustible se reducen considerablemente las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero, a su vez se reducen los costos, ya que no se tiene que estar consumiendo un combustible constantemente o electricidad, por lo tanto, es una alternativa muy viable para cuidar el medio ambiente y la economía.

La forma en que se utiliza la luz solar es mediante un dispositivo de captación de la radiación solar que amplifica su potencial, de acuerdo con sus características puede ser mayor o menor su aprovechamiento.

Estos dispositivos se llaman colectores solares y tienen tres clasificaciones según las temperaturas a las que pueden operar, los hay de baja, media y alta temperatura.

Dentro de estas categorías tenemos dos variantes de equipos, siendo los de baja temperatura los que reciben la luz solar directamente. Para los dispositivos de media y alta temperatura se necesita un arreglo geométrico que concentre la radiación para permitir una mayor captación de calor.

El secado consiste en extraer agua o algún otro líquido de un sólido con el fin de reducir su contenido de humedad.

Para la industria del secado es imprescindible contar con una fuente de calor constante para asegurar que se podrá cumplir con la tarea. Comúnmente el calentamiento del aire se realiza mediante la quema de combustibles o con resistencias eléctricas. El utilizar el sol para calentar el aire representa menores gastos y menor contaminación convirtiéndose en una forma muy atractiva de hacerlo.

Desde hace mucho tiempo la técnica utilizada para la preservación de alimentos y de cultivos agrícolas ha sido el secado solar. Sharma y colaboradores aclaran que hay que hacer una diferencia entre el secado libre al sol y secado solar. El primero de ellos es donde se coloca el material a que reciba directamente el sol en un área extendida y sin protección alguna. Esto se hace en lugares donde se alcanzan temperaturas de 30°C o más. En cambio, el término secado solar es aplicado cuando se utiliza algún equipo para aprovechar de mejor manera la radiación solar y se pueda destinar mejor el calor a alguna aplicación en específico (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Los equipos utilizados para la captación de calor son regularmente colectores solares de baja temperatura. Los tubos evacuados son un tipo de tecnología de captación de energía solar que se encuentra dentro de los colectores de media temperatura. Presentan mejor rendimiento ante los colectores solares de baja temperatura debido a su diseño, que garantiza recibir directamente la radiación solar durante todo el día.

Su construcción consiste en dos tubos concéntricos de vidrio de borosilicato muy resistente. En medio de los tubos de vidrio se extrae el aire para crear vacío y reducir la transferencia de calor por convección con el medio ambiente. El tubo interior está cubierto con una capa de aluminio o de cobre y después una capa absorbidora de color oscuro compuesta de un material de nitrato de aluminio (Fig. 2). Esta capa tiene gran capacidad de absorción y poca emisividad, de esta manera gran parte de la radiación que recibe la transfiere en forma de calor al fluido que tiene en el interior (Abd-Elhady, Nasreldin, & Elsheikh, 2017).

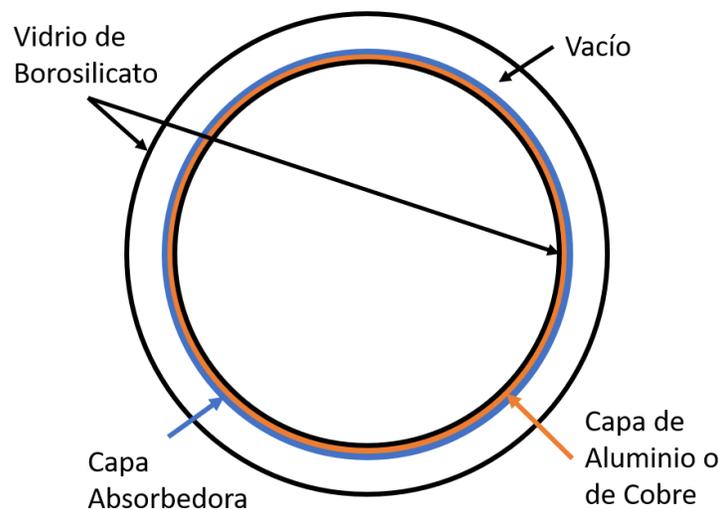


Figura 2. Sección Transversal de un Tubo Evacuado.

Una manera de aprovechar este tipo de tecnología es variar el flujo del fluido que se tenga en el interior de los tubos evacuados. Éstos tienen la capacidad de llegar a temperaturas elevadas de hasta 200°C. Al modificar el flujo se puede variar la temperatura de salida; si el flujo es bajo se tendrá una temperatura alta, en cambio si es un flujo alto la temperatura será menor. De esta manera se puede regular la temperatura de salida según las condiciones requeridas (Garcia Sanchez, 2014).

En investigaciones previas sobre colectores solares para calentamiento de aire se han construido diferentes prototipos. La mayor parte de éstos se han realizado con un fluido que está dentro de los tubos evacuados en un sistema cerrado y circulando debido a la diferencia de densidades al recibir el calor del sol y transfiriéndolo al aire por medio de

convección y conducción a través de una pared metálica. El diseño de un prototipo como este consta de una serie de tubos evacuados colocados en paralelo llenos de agua para proporcionar calor continuamente al aire (Yadav & Bajpai, 2011).

Para esta investigación se contará únicamente con un solo fluido, que se trata de aire, es decir, el calor se aplicaría directamente sobre esta sustancia. Se utilizarán tubos evacuados como sistema de captación de energía, y dentro de ellos el fluido estará en constante movimiento.

Objetivos

El fin de este estudio experimental es evaluar la eficiencia térmica de un calentador de aire que funciona a base de tubos evacuados para uso en procesos de secado.

Objetivos específicos:

- Diseño y construcción del prototipo del colector solar.
- Instrumentación del colector.
- Calibración de la turbina impulsora de aire.
- Experimentación a diferentes condiciones de operación para la caracterización térmica del prototipo.
- Evaluación de la eficiencia térmica del colector solar.

Metodología

Para el desarrollo del estudio se diseñó y construyó un arreglo experimental el cual fue instrumentado para monitorear la temperatura, radiación solar y flujo de aire.

Los experimentos se llevaron a cabo en el exterior en condiciones reales de operación de un secador solar.

Las variables principales fueron monitoreadas y grabadas cada minuto, para ser almacenadas para su posterior análisis.

Para el cálculo de la eficiencia instantánea del colector se utilizó una formulación calorimétrica, usando el flujo másico, radiación solar global incidente en la superficie de los tubos evacuados y la variación de temperatura como datos básicos de análisis.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Situación de las Energías Renovables en el Mundo

Las energías renovables en los últimos años han tenido un gran auge que se refleja en el constante crecimiento que están teniendo cada una de ellas. En el año 2015 se tuvo el mayor crecimiento en capacidad añadida al sistema energético mundial. En algunos casos se tuvo un incremento un poco menor al que se tuvo del 2010 al 2015, en otros se igualó como en el caso de la energía eólica y hasta se superó como en la producción de etanol (Fig. 3).

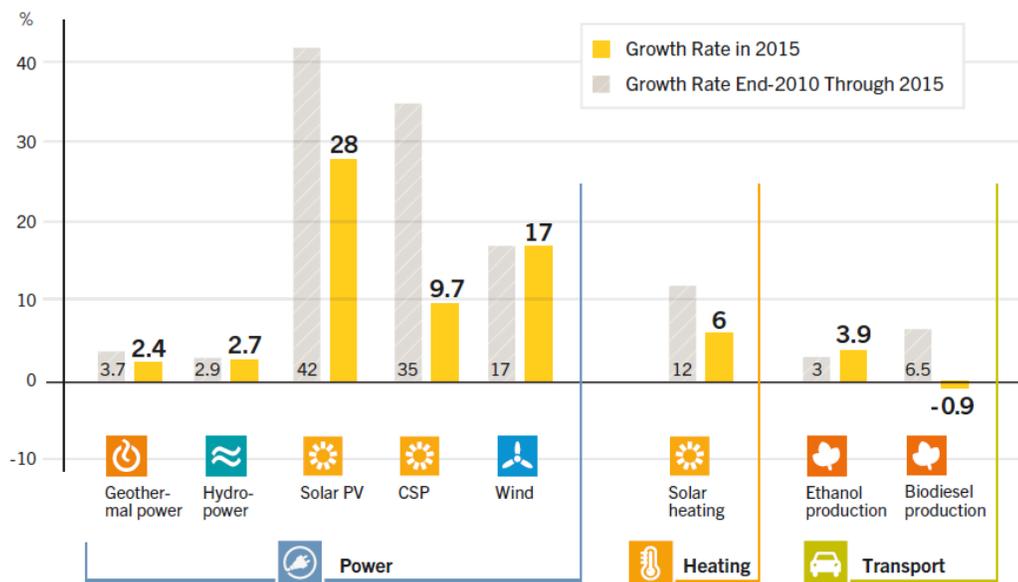


Figura 3. Tasas de Crecimiento Promedio Anuales de las Capacidades de las Energías Renovables y Producción de Biocombustibles, Final-2010 al Final-2015 (REN21, 2016).

Se estima que en 2014 las energías renovables representaron el 19.2% del consumo de energía global final. En cuestión de producción de energía eléctrica se tiene que el 23.7% de electricidad se produjo de fuentes renovables de energía al final del 2015 (REN21, 2016).

Las tecnologías con mayor crecimiento son la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, les siguen de cerca las tecnologías de solar fototérmica, como se observa en la figura 3 en el año 2015. Sin embargo, aún tienen poca presencia en el sistema energético mundial, se espera que el crecimiento siga en aumento y que los valores en proporción de las fuentes renovables de energía con respecto a la energía global puedan ser mayores a los de los combustibles fósiles.

Situación de las Energías Renovables en México

La ley de la transición energética establece que de la producción total de electricidad en México una parte provendrá de fuentes de energía limpias. Se tienen como metas que una proporción de la electricidad provenga de energías limpias; para el 2018 que sea el 25%, para el 2021 que sea el 30%, para el 2024 que sea el 35% y para el 2050 el 50% (SENER, Prospectiva del Sector Electrico 2017-2031, 2017).

En 2016 la capacidad instalada de producción de energía en México era de 73,510 MW, de los cuales el 71.2% corresponde a métodos de producción convencionales y el 28.8% restante representa a producción con energías limpias. En este mismo año la capacidad instalada mediante energías limpias creció un 9.9% con respecto al año anterior.

Para el 2031 se espera que se añadan 55,840 MW de capacidad de generación de electricidad. De esta cantidad las mayores adiciones se harán por parte de centrales de ciclo combinado con 33.9% y centrales eólicas con el 24.2%. Sin embargo, a pesar de que la mayor adición es de tecnologías convencionales, del total de lo añadido el 62.6% corresponderá a energías limpias, siendo las más significativas la energía eólica, la energía solar fotovoltaica y termosolar que juntas representan el 60.6% del total de las energías limpias (SENER, Prospectiva del Sector Electrico 2017-2031, 2017).

Para el 2031 se estima que la capacidad total de generación eléctrica será de 113,296 MW. Esta capacidad se dividirá prácticamente en mitades para la producción de manera convencional y mediante energías limpias (SENER, Prospectiva del Sector Electrico 2017-2031, 2017).

La expectativa para la capacidad instalada en 2031 es que las centrales de ciclo combinado representen el 39.01%, las centrales eólicas el 15.21%, las centrales hidroeléctricas el 12.6% y las centrales fotovoltaicas el 6.91%. Lo restante se dividirá en otras tecnologías convencionales y tecnologías limpias. Es atractivo destacar que solo el 0.01% será por centrales termosolares, esto se debe a que la mayor parte de tecnología termosolar a instalar será destinada a procesos de obtención de calor (SENER, Prospectiva del Sector Electrico 2017-2031, 2017).

El potencial que tiene la energía solar es muy grande, si se pudiera aprovechar por completo podríamos satisfacer nuestras necesidades energéticas. Por ejemplo, en nuestro país en 2015 se consumieron 288,232 GWh de energía eléctrica (SENER, Programa de Desarrollo del Sistema Electrico Nacional 2016-2030 PRODESEN, 2016). De acuerdo con el grafico de radiación solar (figura 1) nuestro país se encuentra en una zona de alrededor de 2000 kWh/m² anuales. Si pudiéramos aprovechar el 100 por ciento de la energía solar recibida podríamos satisfacer nuestra demanda de electricidad con solo 144 mil metros cuadrados, es decir, un área de 15 hectáreas aproximadamente. Esto sería en el mejor de los casos, aun así, existe la oportunidad de poder llegar a cubrir nuestra necesidad energética únicamente utilizando las energías renovables, en especial el recurso solar, posiblemente con un área significativa no muy grande.

Energía Solar Fotovoltaica y Térmica

La energía solar es una de las alternativas con mayor auge presentado en los últimos tiempos, liderando con la energía fotovoltaica y detrás le sigue la energía solar térmica.

La energía fotovoltaica ha tenido más importancia en los últimos años debido a que su forma de producir energía es de manera directa. El aprovechamiento del efecto fotoeléctrico es tal que con solo la incidencia de la luz solar en un panel fotovoltaico se puede producir electricidad. Esta facilidad de generar energía eléctrica ha permitido su avance y el crecimiento de esta tecnología.

Hoy en día contamos con diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos con eficiencias, costos y tiempos de vida útil variados. Con el paso del tiempo el precio de esta tecnología

ha ido disminuyendo. En un principio solo estaba disponible para pocas personas, pero hoy en día al ser más barata está al alcance de un mercado más grande, por lo que su utilización va en aumento.

En la figura 4 vemos que en 2015 la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica fue de 227 GW, 50 GW más que el año anterior, lo que representa un crecimiento del 28.2% (REN21, 2016). Se espera que el crecimiento siga de manera exponencial aunado a la baja de precios y a la gran producción de paneles fotovoltaicos.

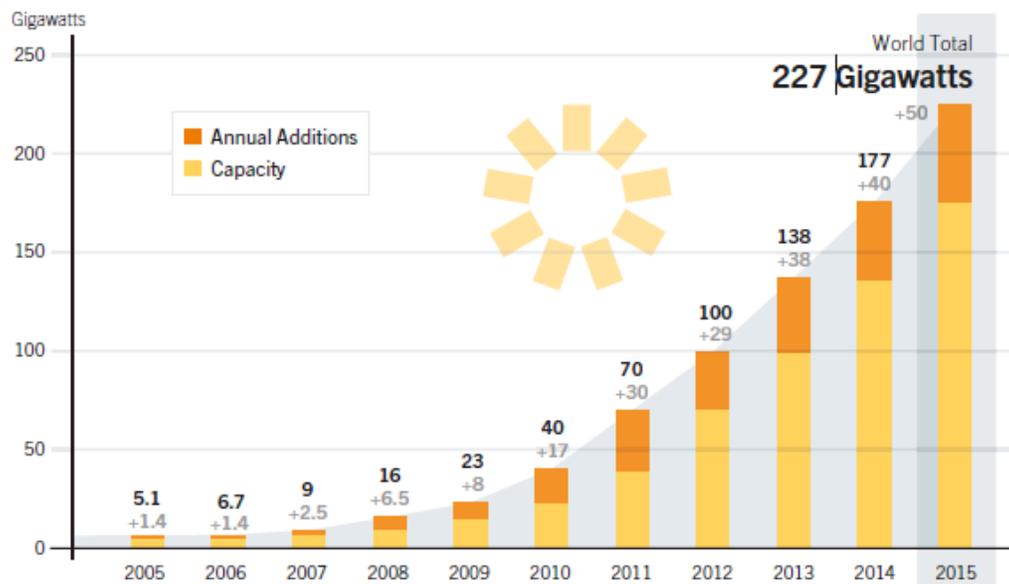


Figura 4. Capacidad Global de Energía Solar Fotovoltaica y Adiciones Anuales, 2005-2015 (REN21, 2016).

En el caso de la energía solar térmica, de acuerdo con el propósito final al que esta destinada se divide en dos categorías para cuestiones estadísticas, que son la energía eléctrica producida por concentración solar y calentamiento solar.

En 2014, la capacidad de generación eléctrica por concentración solar alcanzó 4.3 GW en el mundo y al año siguiente 4.8 GW, añadiendo más de 400 MW. Sin embargo, se espera que la capacidad aumente considerablemente ya que hay nuevas plantas que se han construido en los últimos años. Como se observa en el siguiente gráfico (Fig. 5) los países líderes en este ámbito son Estados Unidos y España al poseer el 90% de la capacidad mundial instalada (REN21, 2016).

Esta industria empezó a crecer a pasos agigantados, más que nada por el impulso en la industria eléctrica española. En solo 10 años, de 2005 a 2015 se aumentó más de diez veces la capacidad instalada. 2008 es un año importante, ya que se disparó la tasa de crecimiento de manera exponencial.

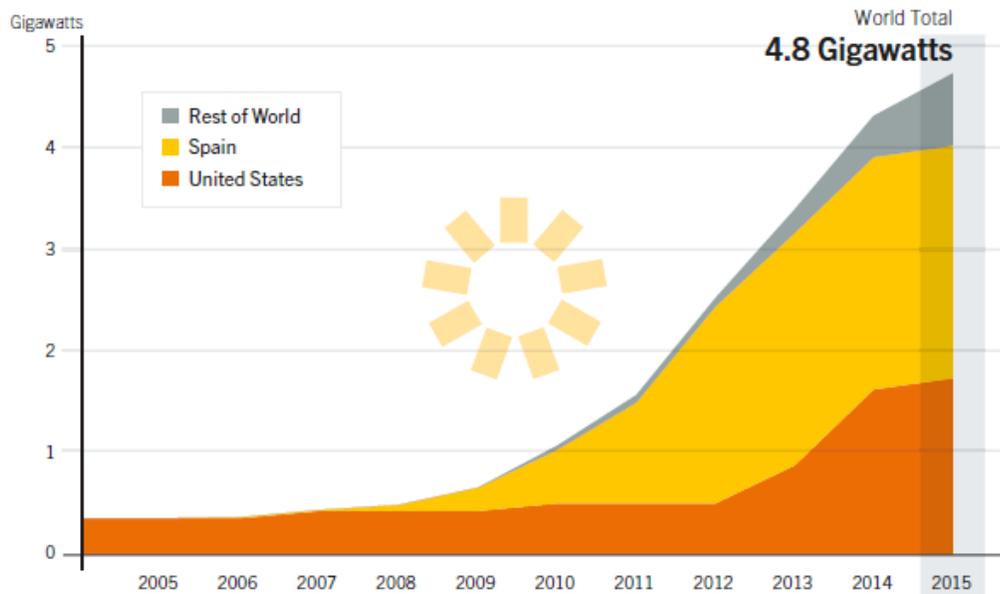


Figura 5. Capacidad Global de la Energía Solar Térmica de Concentración, por País/Región, 2005-2015 (REN21, 2016).

Para el calentamiento solar de agua en 2014 se llegó a una capacidad de 409 GWth y en 2015 fueron 435 GWth con un crecimiento presentado del 6.3% (REN21, 2016). En la figura 6 se observa que la capacidad de la energía solar térmica creció el doble del 2010 al 2015 que en los 5 años anteriores. Su tasa de crecimiento es menor que de otras energías, pero lo importante es que va en aumento.

La oportunidad de aprovechamiento sobre esta energía renovable es muy grande, diariamente recibimos energía en forma continua. Hay múltiples actividades donde se necesita calor para llevar a cabo un trabajo. Por ejemplo, es posible calentar agua para uso doméstico, para albercas, para uso comercial o industrial. También se pueden cocinar alimentos, para calefacción de edificios y viviendas, producción de hielo, refrigeración solar, secado, fundición de metales, purificación y tratamiento de aguas contaminadas, destilación de agua de mar y producción de energía eléctrica.

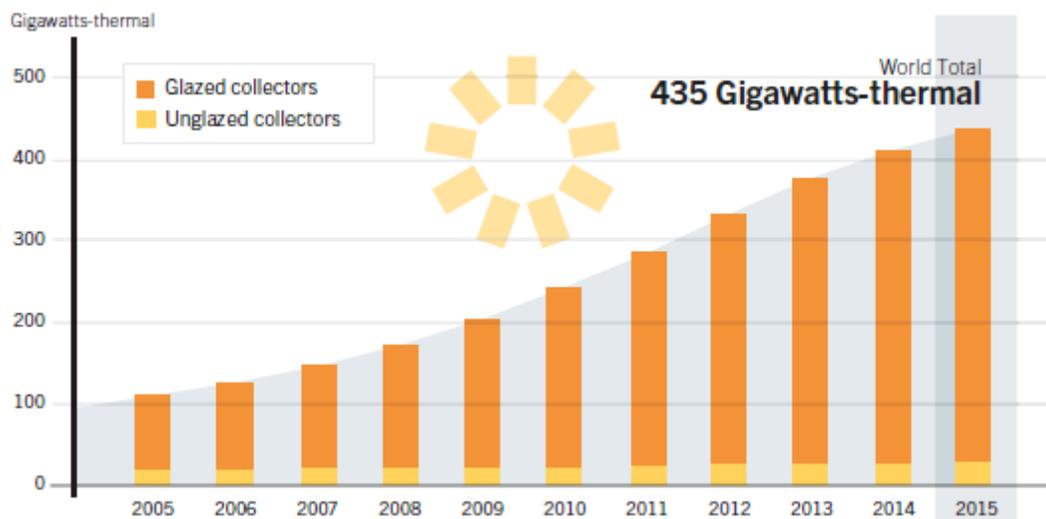


Figura 6. Capacidad Global de Colectores Solares de Calentamiento de Agua, 2005-2015 (REN21, 2016).

Las nuevas instalaciones de colectores solares para aprovechamiento calórico en los 18 países líderes en este sector al 2015 corresponden al 76% de colectores de tubos evacuados, el 20% de colectores planos y el 4% de colectores planos sin cubierta (unglazed collectors) (REN21, 2016).

Necesidad de Calor

Una de las formas en que se utiliza gran cantidad de energía es en la obtención de calor. En el mundo el 52% del consumo final de energía está destinado a producir calor (Fig. 7). El 72% de este se produce a partir de la quema de combustibles fósiles, el 9% mediante energías renovables, el 14% se produce con biomasa y el 5% con electricidad. Mas de la mitad del calor se utiliza en la industria y lo restante en calefacción de inmuebles, calentamiento de agua y para cocinar (Collier, 2018).

El papel de las energías limpias en este ámbito es cada vez más importante, entre 2007 y 2015 el calor producido por fuentes renovables creció un 23% (Collier, 2018).

En 32 países altamente industrializados el 44% del total de la demanda de calor proviene de las aplicaciones industriales. La demanda de calor industrial es de 30% para temperaturas por debajo de los 100°C y el 57% por debajo de los 400°C (Bohorquez Colombo, 2013).

En México, el consumo energético en el sector industrial corresponde al 26.3% del total de la energía consumida. La mayor parte de la necesidad energética para el sector industrial y comercial se encuentra entre temperaturas menores a 80°C y hasta los 250°C (Estrada Gasca, 2013).

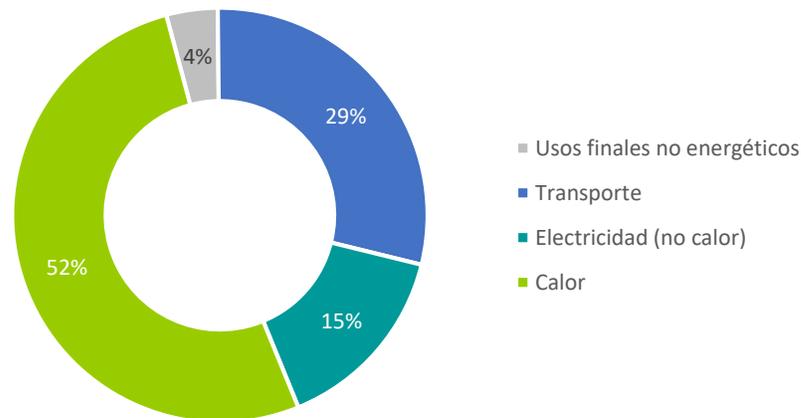


Figura 7. Calor en el Consumo Final Total Global, 2015 (Collier, 2018).

Dispositivos solares térmicos

Para poder hacer uso del calor obtenido a través de la radiación solar se necesitan los colectores solares. Estos dispositivos se encargan de atrapar la energía y transferirla a un medio que la almacene y la transporte hacia donde sea necesario. Los dispositivos de acuerdo con las temperaturas de operación que manejan se clasifican en tres categorías de baja, media y alta temperatura.

Los colectores de baja temperatura consisten en equipos que operan a temperaturas menores a 65°C. Estos sistemas son colectores solares planos, en los cuales su construcción trata básicamente de un contenedor tipo caja, regularmente de color negro en el interior, para absorber una mayor cantidad de energía.

Otra característica es que puede estar cubierto, o no, por un vidrio que deja pasar la radiación solar. En el caso de que este cubierto, su función es aumentar la temperatura de las superficies y del aire en el interior del contenedor. Estos colectores tienen diferentes aplicaciones como secado, calentamiento de agua para su uso en viviendas y para calentamiento de albercas.

Según el uso que se le vaya a dar, el colector dentro del contenedor puede tener diferentes configuraciones. Por ejemplo, para calentamiento de agua se utiliza un arreglo de tubos en su interior para alcanzar mayores temperaturas, los tubos pueden ser desde acero, hasta de cobre para tener mejor conductividad térmica. En el caso del secado, que por lo general son alimentos, se tiene un arreglo con rejillas o charolas donde se coloca el material a secar (Energía solar termica de baja temperatura, 2015).

Los colectores de media temperatura operan a entre los 100 y 300°C. Para alcanzar dichas temperaturas es necesario contar con un sistema de concentración de la radiación. Los equipos con estas características son los tubos evacuados, receptores de canal parabólico, colector solar tipo Fresnel lineal. Entre las aplicaciones en que se utilizan este tipo de colectores se tienen destilación solar, secado, calor para procesos industriales, entre otros (Energía solar termica de media temperatura, 2018).

Los colectores de alta temperatura alcanzan valores mayores a 500°C. Hay varias tecnologías que tienen diferentes rangos de temperatura. Los colectores cilindro parabólicos pueden alcanzar hasta 450°C; las plantas solares de torre central que pueden operar a temperaturas mayores a 500°C; los discos parabólicos con capacidad de calentar a más de 750°C; un horno solar que puede llegar a miles de grados centígrados. Estas tecnologías se utilizan para proporcionar calor a procesos industriales, sin embargo, su principal función es la producción de energía eléctrica. En el caso del horno solar se dedica más al trabajo de la fundición, creación de combustible de hidrogeno o nanomateriales (Energía solar termica de alta temperatura, 2015).

Secado

El mecanismo del secado es por evaporación de la humedad contenida en una sustancia. Regularmente se hace mediante una corriente de aire con condiciones específicas para acarrear el vapor de agua (Treybal, 1980).

En el secado solar se lleva a cabo este mismo proceso obteniendo la energía calorífica a través de la radiación solar con el fin de darle las condiciones adecuadas al aire para que tenga la capacidad de arrastrar el vapor y reducir el contenido de humedad del material a secar.

Los sistemas de secado solar tienen dos formas de funcionamiento: de convección natural (secadores pasivos) y de convección forzada (secadores activos). Dentro de ellos se encuentran cuatro tipos de secadores de acuerdo con sus características de operación, que son secadores directos, indirectos, mixtos y secadores solares híbridos (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010; El-Sebaili & Shalaby, 2012).

Clasificación de los secadores

Los secadores solares de convección natural o pasivos basan su funcionamiento en el movimiento natural del aire caliente. No cuentan con partes o equipos móviles, lo que los hace fácil de construir y no muy costosos (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Los secadores activos o de convección forzada son equipos en los que se utiliza una turbina o soplador para mover el aire calentado desde un colector solar hacia la cámara de secado y así transferir la energía hacia los materiales a secar (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Tipos de secadores

Los secadores solares directos (Fig. 8) se caracterizan por exponer directamente a la luz solar la sustancia a secar. De toda la radiación recibida una parte es reflejada a la atmósfera y lo restante ingresa dentro del secador. Una parte es absorbida por la superficie del material, lo que provoca que aumente su temperatura. Esto en conjunto

con la temperatura dentro de la cámara de secado propicia la evaporación del agua dentro del material, la cual es arrastrada por la acción del movimiento del aire (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

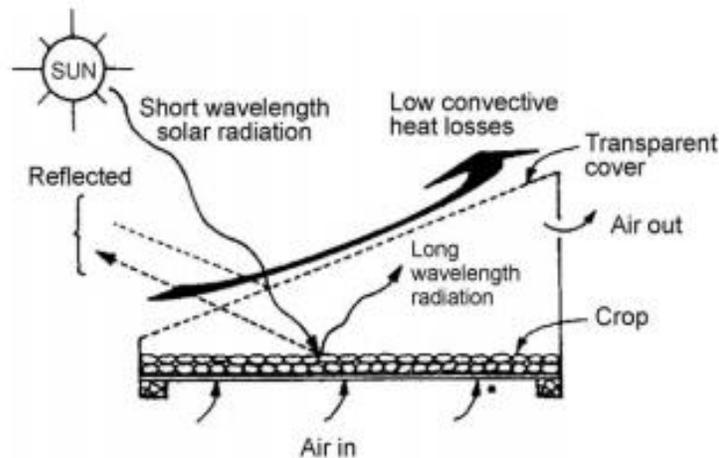


Figura 8. Principio de Trabajo del Secador Solar Directo (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Su construcción se basa en una caja que contiene la sustancia a secar colocada en charolas o rejillas. Si se trata de un secador pasivo las paredes tienen varios orificios alrededor situados en la parte baja y alta para favorecer el movimiento natural del aire, en cambio si se trata de un secador activo únicamente tiene una entrada y una salida del aire (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010).

Las paredes del interior de la caja son de algún color opaco que absorba la mayor cantidad de energía y retener más calor. Cuentan con una cubierta transparente, generalmente de vidrio que deja pasar la radiación solar y reduce las pérdidas por convección con el exterior. Debido al calor absorbido, las paredes y la sustancia empiezan a irradiar ondas de longitudes largas que no pueden atravesar la cubierta lo que provoca el fenómeno del efecto invernadero (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

En los secadores solares indirectos (Fig. 9) el material a secar no se expone directamente a la luz solar para minimizar su decoloración y posibles fracturas en su superficie. Con esta técnica pasa aire caliente con la capacidad de arrastrar la humedad alrededor de la sustancia y de transferirle calor. La principal causa de la evaporación es

la transferencia de agua debido al gradiente de concentración en la corriente de aire y en la zona cercana a la superficie (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

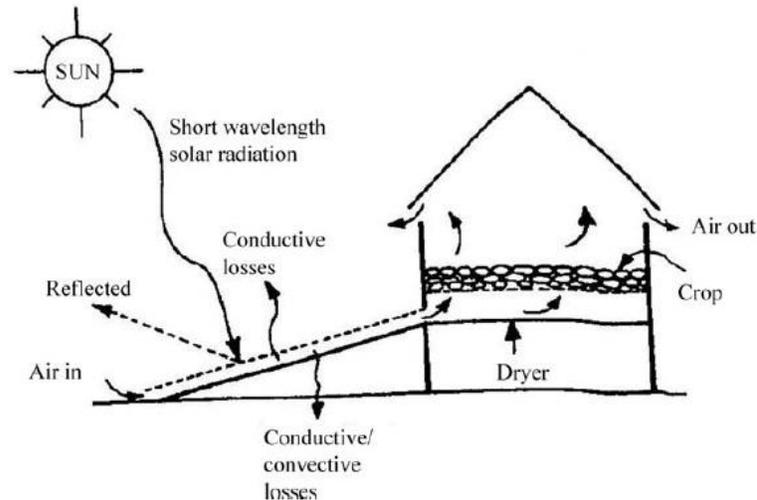


Figura 9. Principio de Funcionamiento del Sistema de Secado Solar Indirecto (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Su construcción más común consiste en una caja completamente cerrada que cuenta con una entrada en la parte inferior y una salida en la parte superior para el aire caliente. Dentro de la caja se coloca la sustancia en rejillas para proporcionar la mayor área de contacto posible (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

Los siguientes componentes importantes son el impulsor de aire y la unidad térmica que recolecta el calor de la luz solar. Este último se encuentra separado de la cámara de secado y puede tener diferentes configuraciones de captación de energía y de operación.

Los secadores solares mixtos se tratan de una mezcla de los dos anteriores. En su funcionamiento se utiliza el secado mediante la radiación directa al material y a su vez se tiene una corriente de aire caliente proveniente de un colector solar (El-Sebaï & Shalaby, 2012).

Los secadores solares híbridos son una combinación de un secador solar con una fuente de calor extra para su aprovechamiento, las cuales utilizan algunas tecnologías auxiliares para los secadores. Se pueden hacer combinaciones con sistemas de almacenamiento térmico, de energía geotérmica, de aguas residuales, de energía

eléctrica, de energía de biomasa, de energía fotovoltaica, de bomba de calor, de bomba de calor química, sistemas de deshumidificación asistidos con energía solar y de la quema de gas o de diésel (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010).

En el secado solar indirecto una de las partes más importantes es el colector solar, el cual se encarga de proporcionar energía al sistema para elevar la temperatura del aire y facilitar el proceso de secado.

Dentro de las diferentes tecnologías utilizadas como colector solar se encuentran los colectores solares planos comunes. Hay modificaciones que se les realizan con el fin de absorber más calor agregando en su interior arreglos con materiales de conductividad térmica alta como los de Ranura en V, que tienen laminas en su interior para ayudar al aumento de la temperatura; también se tienen los de aluminio corrugado en W, que tienen en el interior laminas con ondulaciones pintadas de color negro. Algunos otros colectores utilizan diferentes materiales como malla de alambre y aletas (Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, & Sulaiman, 2010; El-Sebaili & Shalaby, 2012).

Temperatura del aire para secado

El secado es una de las técnicas de preservación utilizada por la industria alimentaria donde más se beneficia el almacenamiento de alimentos, debido a que es una forma rápida, eficiente y saludable de hacerlo. La reducción del contenido de agua en el alimento es necesario para prevenir su descomposición.

En los alimentos se tienen diferentes rangos de temperatura para secado. Los de baja temperatura requieren aire sin calentar o elevar su temperatura unos cuantos grados; de media temperatura los alimentos no tienen que sobrepasar los 43°C; de alta temperatura soportan temperaturas de hasta 82°C. Hay algunos materiales que requieren temperaturas mayores, como el caso de los granos que requieren temperaturas de alrededor de 90°C (Maier & Bakker-Arkema, 2002).

Sharma y colaboradores (2009) muestran en su revisión de sistemas de secado solar algunos alimentos que corresponden a los de baja y media temperatura. Se enlistan las temperaturas máximas de secado que soportan los alimentos siendo el promedio de

60°C (Tabla 6, Anexo A). La madera, un material que soporta altas temperaturas, necesita de un pre-secado con temperaturas entre 24°C y 38°C para reducir un poco su contenido de humedad. A partir de ahí, se lleva el proceso final de secado con temperaturas entre 80°C y hasta 115°C (Reeb, 1997).

Tubos Evacuados

Los tubos evacuados debido a la forma de su estructura y características presentan mejores resultados que los colectores solares planos convencionales. Tienen la capacidad de alcanzar temperaturas más altas al tener un vacío entre los tubos concéntricos de vidrio y evitar pérdidas de calor con el ambiente y por recibir directamente la radiación solar a lo largo del día por su geometría.

Estos colectores solares se utilizan generalmente para calentamiento de agua. Se utilizan calentando el líquido directamente o hay una variante de esta tecnología llamada heat pipe, que utiliza una tubería de cobre y materiales que absorben calor dentro de los tubos evacuados, especialmente materiales de cambio de fase. Por la tubería de cobre se transporta el líquido a calentar. Las eficiencias de los tubos evacuados rondan entre el 50% y 60%, para los de heat pipe se ha logrado aumentar la eficiencia entre 10% y 20% más que los convencionales (Hayek, Assaf, & Lteif, 2011).

Eficiencia de los Colectores Solares

Para evaluar el comportamiento de los colectores solares se estudia su desempeño bajo diferentes condiciones externas. Generalmente los colectores solares se utilizan para calentar agua. Para este estudio se toman en cuenta las condiciones ambientales tomando la diferencia entre la temperatura de entrada y la temperatura ambiental dividida entre la irradiancia. Este valor se utiliza de variable de medición para la eficiencia instantánea del equipo obteniendo funciones lineales con pendiente negativa como se muestra en la figura 10, donde se observa que los colectores menos afectados por las condiciones ambientales son los tubos evacuados. (Reda, 2017).

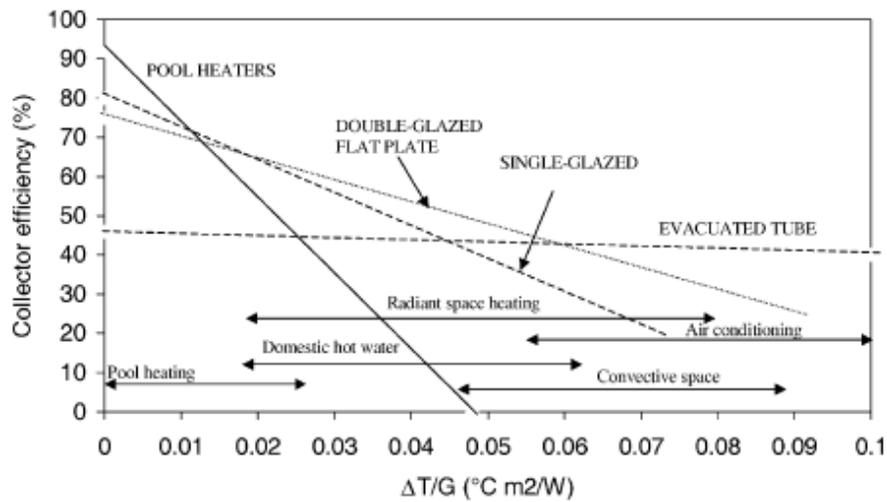


Figura 10. Eficiencias de varios colectores de líquidos (Kalogirou, 2004).

Otro método de para determinar la eficiencia de un colector solar es a base de correlaciones experimentales para evaluar la eficiencia instantánea de los colectores solares donde se muestran curvas de segundo grado (Fig. 11). Para este análisis se utiliza la diferencia de la temperatura promedio del colector con la temperatura ambiente dividido entre la irradiancia. Las correlaciones se obtienen al utilizar la definición de calor en donde interviene el calor absorbido y las pérdidas de calor. Se considera que este análisis es más exacto que cuando se tienen modelos lineales para la eficiencia (Hayek, Assaf, & Lteif, 2011).

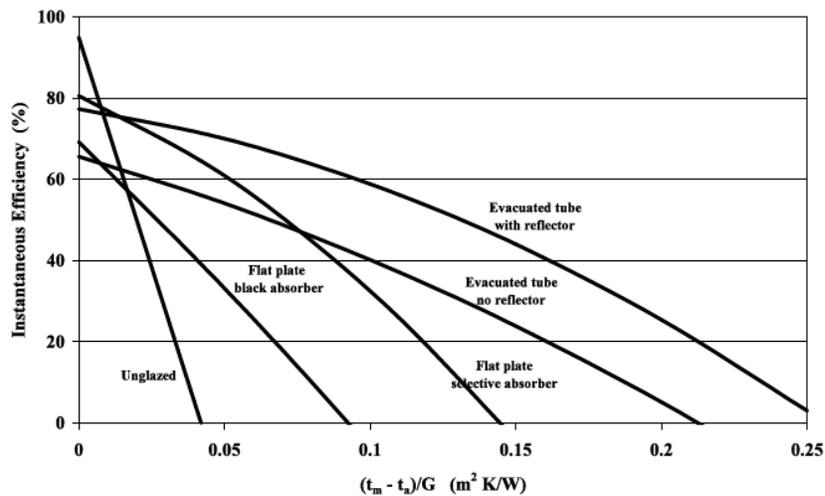


Figura 11. Curvas de eficiencia instantánea para varios tipos de colectores solares (Sustainability Victoria, 2010).

Calentadores de aire de tubos evacuados

Para esta investigación se estudia cómo se comporta los colectores de tubos evacuados para calentar aire. Un secador que utilice un colector solar de este tipo se clasifica en los secadores solares indirectos. Los tubos evacuados se consideran como el equipo adecuado para el calentamiento de aire debido a que presentan bajas pérdidas de calor al ambiente y tienen la posibilidad de mantener una buena eficiencia térmica en un amplio rango de operación.

En India, se realizó un estudio experimental de un colector solar de tubos evacuados para calentar aire. El colector está construido con 40 tubos evacuados, con un área superficial de 4.44 m². Los tubos están conectados a un conducto cuadrado y su interior se encuentra lleno de agua. Dentro del conducto va una tubería por donde pasa el aire. La transferencia de calor se lleva a cabo por convección y conducción desde el agua hacia el aire. Los resultados obtenidos fueron elevar la temperatura hasta 20°C alcanzando temperaturas del aire de salida de 60°C (Yadav & Bajpai, 2011).

En un experimento de calentamiento de aire utilizando tubos evacuados y comparando el uso de materiales de almacenamiento térmico, donde se utilizaron 12 tubos evacuados, 4 de ellos con un material de cambio de fase, cera de parafina, 4 con aceite de alta capacidad calorífica y 4 vacíos. Dentro de cada tubo se encuentra una tubería de cobre en forma de U conectada en serie, esto quiere decir que el aire pasa por un tubo evacuado a la vez. Encontraron que con el material de cambio de fase se alcanzaron temperaturas más altas, seguidas por los tubos que tenían aceite y por último los vacíos. De igual manera el uso de materiales de almacenamiento térmico permite seguir calentando aire por hasta 4 horas más después de haberse metido el sol (Tyagi, Pandey, Kaushik, & Tyagi, 2012).

Poniendo atención al calentamiento de aire sin material de almacenamiento térmico, que son las condiciones que se quieren estudiar, se alcanzan temperaturas de alrededor de 120°C aun en valores de flujo alto, con valores bajos se alcanzaron valores cercanos a los 100°C. Es rescatable mencionar que en este experimento el aire en su recorrido pasa 4 veces por los tubos evacuados, ya que la tubería de cobre al salir de un tubo ingresa a otro.

En el Instituto Nacional de Tecnología de Kurukshetra, India, desarrollaron un equipo para calentamiento de aire utilizando 15 tubos evacuados con un sistema de tuberías que inyecta el aire hacia el interior de estos. El aire se introduce por medio de un soplador a dos flujos máscicos diferentes, uno bajo a 6.7 kg/h y otro alto a 13.28 kg/h. Las pruebas experimentales se hicieron en dos etapas una colocando una superficie reflectiva debajo de los tubos evacuados y otra sin la superficie. A 6.7 kg/h encontraron que con la superficie reflectiva debajo de los tubos evacuados aumenta el rendimiento del equipo, alcanzando un máximo de temperatura de 97.4°C con la superficie reflectiva y 79.9°C sin ella. Con el flujo alto alcanzaron 69°C sin la superficie y 77.5°C con ella (Kumar, Kumar, Nagar, & Yadav, 2013).

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SET EXPERIMENTAL

El equipo que se desarrolló para calentamiento de aire se considera como un secador activo de tipo indirecto, debido a que el aire es impulsado por una turbina y se calienta en un colector solar de tubos evacuados.

El colector solar (Fig. 12) está construido con 5 tubos evacuados colocados en un tubo de polipropileno de 0.15 m de diámetro y de 0.70 m de largo, los tubos están inclinados 16 grados con respecto a la horizontal y están separados 2.5 cm entre ellos. Se seleccionó tubería de polipropileno por sus propiedades térmicas, específicamente su resistencia a altas temperaturas (Tabla 1).

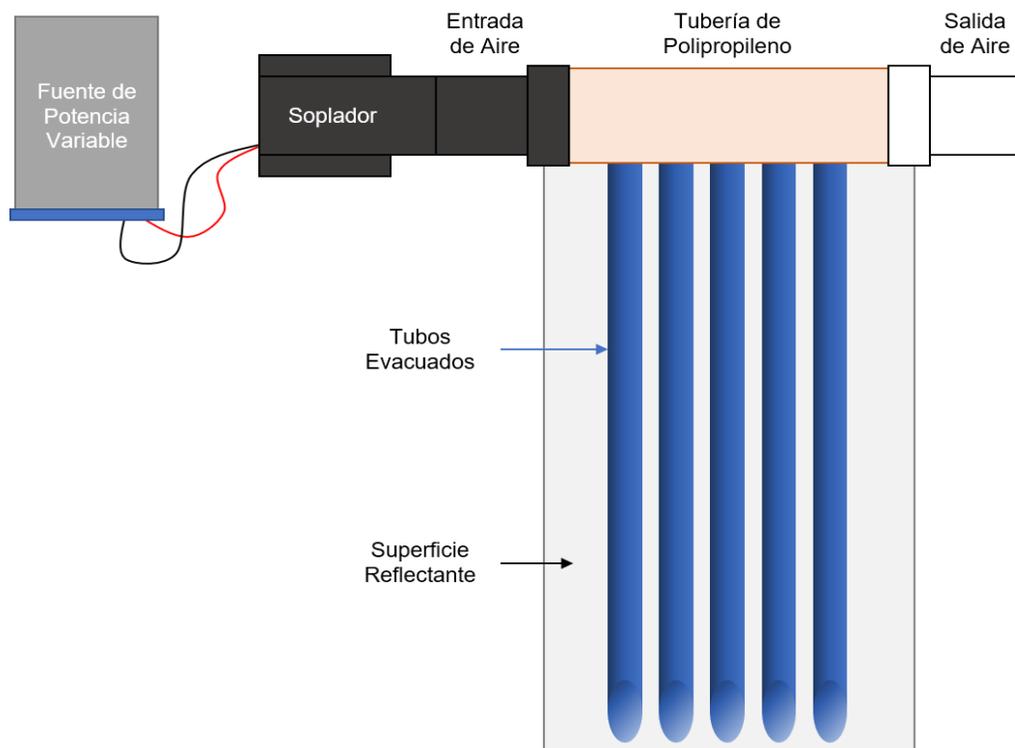


Figura 12. Diagrama de la configuración experimental del colector solar.

Tabla 1. Propiedades Térmicas del Polipropileno (Industrias JQ, 2016).

| Propiedades Térmicas | Unidad | ASTM | DIN | Valores |
|--|-------------|-------|-------|---------|
| Calor Especifico | Kcal/Kg °C | C-351 | | 0.48 |
| Temp. De Flexión B/Carga (18.5kg/Cm ²) | °C | D-648 | 53461 | 55 |
| Temp. De Uso Continuo En Aire | °C | | | 0 A 100 |
| Temp. Mínima Soportada | °C | | | -10 |
| Temp. Máxima Soportada | °C | | | 140 |
| Temp. De Fusión | °C | | | 160 |
| Coef. De Dilatación Lineal De 23 A 100°C | Por °C | D-696 | 52752 | 0.00018 |
| Coef. De Conducción Térmica | Kcal/m h °C | C-177 | 52612 | 0.19 |

Los tubos evacuados (Fig. 13) son de vidrio borosilicato, el tubo interior cuenta con una capa absorbidora de Al-Ni/Al y entre el tubo exterior y el interior se encuentra vacío para evitar pérdidas de calor. Las dimensiones de los tubos son de 1.80 m de largo, el diámetro exterior del tubo de vidrio es de 0.0582 m y el del tubo absorbedor en el interior es de 0.0451 m. La longitud efectiva de la capa absorbidora de cada tubo mide 1.77 m y el área efectiva total del colector solar es de 0.515 m².

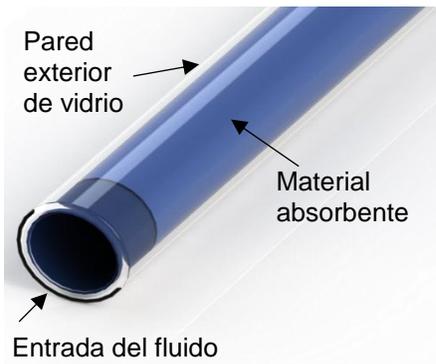


Figura 13. Esquema de un Tubo Evacuado.

El sistema está montado en una estructura con dos soportes de madera de 0.50 m. de alto y reforzada con varillas de acero. Sobre dos canaletas de acero están apoyados los tubos evacuados y por debajo de ellos se encuentra una superficie reflectante de color blanco.

Mediante una estructura en el interior se inyecta aire al sistema con un arreglo de una tubería de acero inoxidable de 0.075 m de diámetro y de 0.56 m de largo, donde están colocados tubos Conduit de pared delgada introducidos 1.40 m dentro de cada uno de los tubos evacuados. El aire es alimentado al colector por medio de un soplador con capacidad de 1/35 hp, el cual funciona con una fuente de potencia variable y soporta hasta 12 V.

Un esquema con las partes principales del equipo se muestra en la figura 14. Las flechas verde y roja indican la entrada y salida de aire del equipo respectivamente. Las flechas de color blanco indican la entrada del aire frío hacia el interior de los tubos y las de naranja la salida de aire caliente de los mismos.

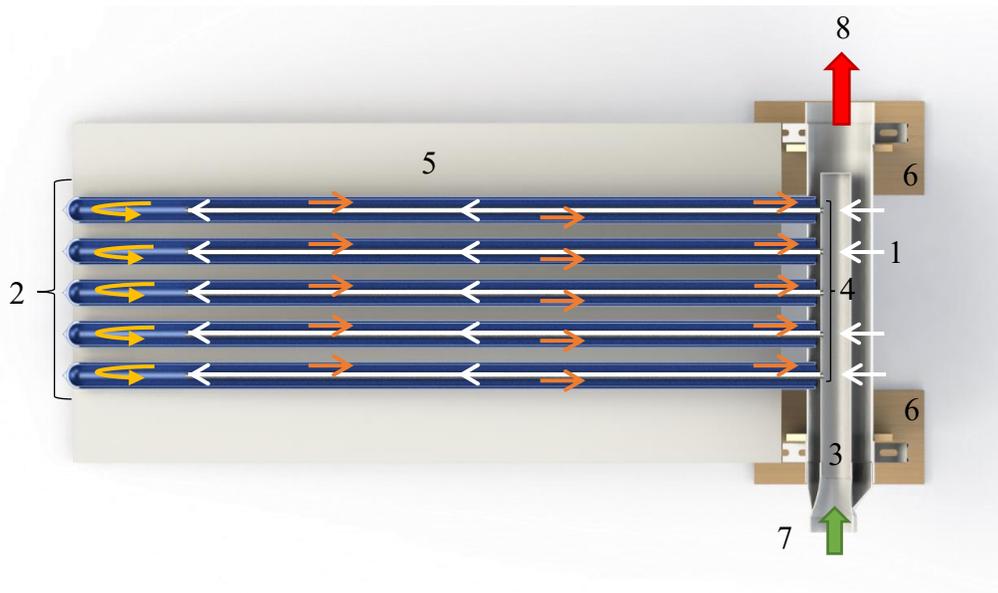


Figura 14. Diseño del Secador: 1) Tubo de Polipropileno; 2) Tubos Evacuados; 3) Tubo de Acero Inoxidable; 4) Tubos Conduit de Pared Delgada; 5) Superficie Reflectante; 6) Soportes; 7) Entrada de Aire; 8) Salida de Aire

Instrumentos de medición

En la experimentación se midieron los parámetros siguientes:

- Temperatura del aire de entrada y de salida

- Intensidad de la radiación solar
- Flujo de aire

Los parámetros principales se midieron puntualmente. Las temperaturas del aire de entrada y de salida se miden con termopares tipo K (Fig.15), con una resolución de 0.01°C. La irradiancia solar es medida por un piranómetro CMP11 (Fig. 16) inclinado 16 grados con respecto a la horizontal al igual que los tubos evacuados (Fig. 17).



Figura 15. Termopar tipo K.



Figura 16. Piranómetro Campbell Scientific CMP11.

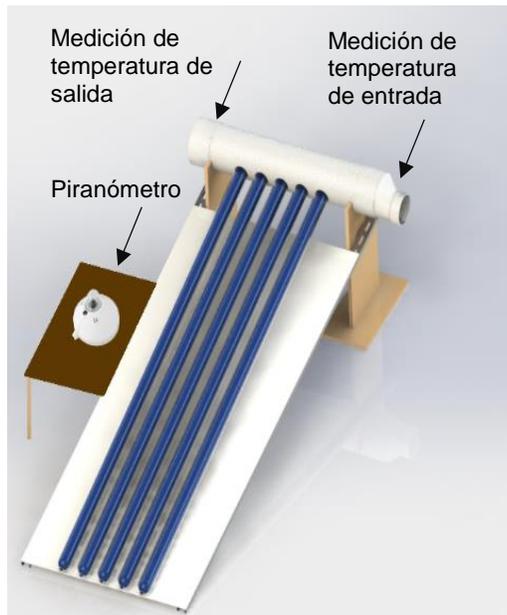


Figura 17. Esquema del Colector con los Sensores de Medición.

El flujo de aire se midió con un anemómetro de alambre caliente Extech 407119A (Fig. 18) con una exactitud de 0.1 m/s para diferentes voltajes a los que se puso a operar la turbina. La experimentación tuvo dos fases; la primera se llevó a un flujo másico constante. La segunda se hizo variando el flujo con valores bajos y altos. La experimentación se llevó a cabo de marzo a Agosto del 2017 dentro de las instalaciones del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora. La configuración experimental real del colector solar se muestra en la figura 19.



Figura 18. Anemómetro de alambre caliente Extech 407119A.



Figura 19. Configuración Experimental del Colector Solar.

En la primera fase los datos arrojados por los sensores de temperatura se recopilaron por un compilador CR10 tomando muestras cada minuto y los datos de irradiancia se recopilaron con un adquisidor modelo CR1000 tomando muestras cada 30 segundos, por un total de 11 horas al día aproximadamente.

En la segunda fase todas las variables de temperatura y de radiación se tomaron con el adquisidor de datos CR10 guardando valores cada minuto por un tiempo de alrededor de 11 horas al día.

Cálculo de parámetros de evaluación

Para un análisis completo del funcionamiento y rendimiento del colector solar se requiere del cálculo de ciertos parámetros como la energía total recibida, calor útil total (Q_u) y por último la eficiencia. Para el cálculo del calor útil total ganado, primero se obtuvieron los valores de calor puntual a cada instante de medición, el cual fue calculado por medio de:

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico (kg/s)

C_p = calor específico (J/kg K)

ΔT = Diferencia de temperatura de salida y entrada (°C)

Q = flujo de calor (J/s)

Integrando la ec. (1) con respecto al tiempo donde se realizó la experimentación, se obtiene el calor útil total:

$$Q_u = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (2)$$

Siguiendo el mismo método se obtuvo la energía total recibida. Se calculó la integral de la radiación instantánea, posteriormente multiplicada por el área expuesta.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I A dt \quad (3)$$

Donde:

E = Energía total recibida (J)

I = Irradiación solar recibida (J/m²)

A = Área (m²)

La eficiencia fue obtenida por la razón del calor útil total y la energía total recibida multiplicada por cien.

$$\eta = \frac{Qu}{E} \times 100 \quad (4)$$

Los valores de la densidad y del calor específico se obtuvieron en función de la temperatura. De las tablas 7 y 8, anexo A, se tomó un rango de 0 a 100°C y se encontró una ecuación en función de la temperatura para cada parámetro como se observa en las figuras 20 y 21.

Las curvas de tendencia obtenidas dieron una ecuación en función de la temperatura para el calor específico:

$$Cp = 0.0000004T_m^2 + 0.0000244T_m + 1.0039496 \quad (5)$$

Para el caso de la densidad tenemos que:

$$\rho = 1.28098e^{-0.0031T_m} \quad (6)$$

En ambas ecuaciones, 5 y 6, se utiliza un valor promedio de la temperatura del aire de entrada y de salida.

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (7)$$

Para la eficiencia del colector se seguirá la prueba de colectores europea EN12975 (Genersys, 2003). La correlación presentada es aplicable por sus características en el estudio de este calentador de aire.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{I} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{I} \quad (8)$$

En la ec. 8, η_0 representa la eficiencia sin pérdidas de calor; T_m , la temperatura promedio del colector; T_a , la temperatura ambiental; a_1 y a_2 describen las pérdidas de calor.

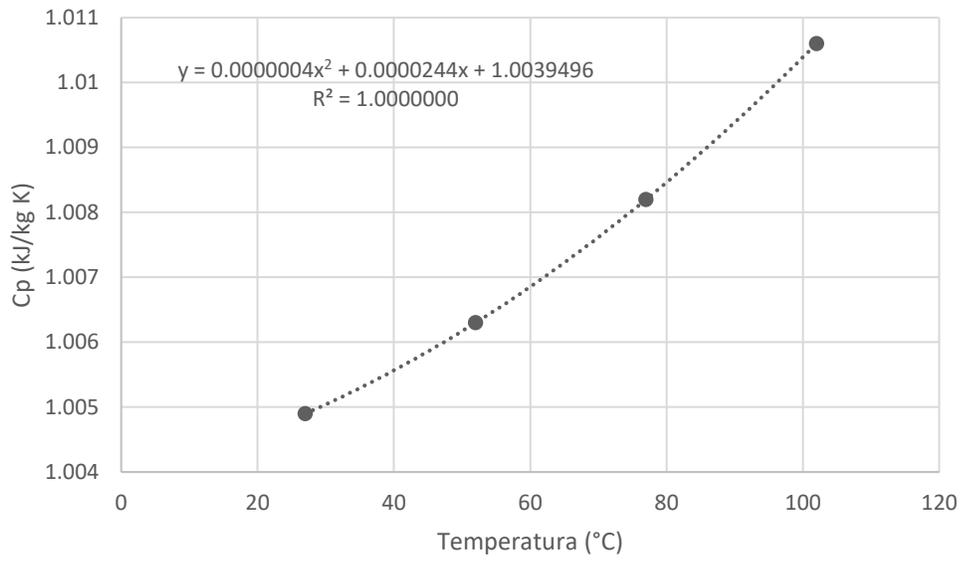


Figura 20. Calor específico en función de la temperatura de 27°C a 102°C (Engineering ToolBox, 2005)

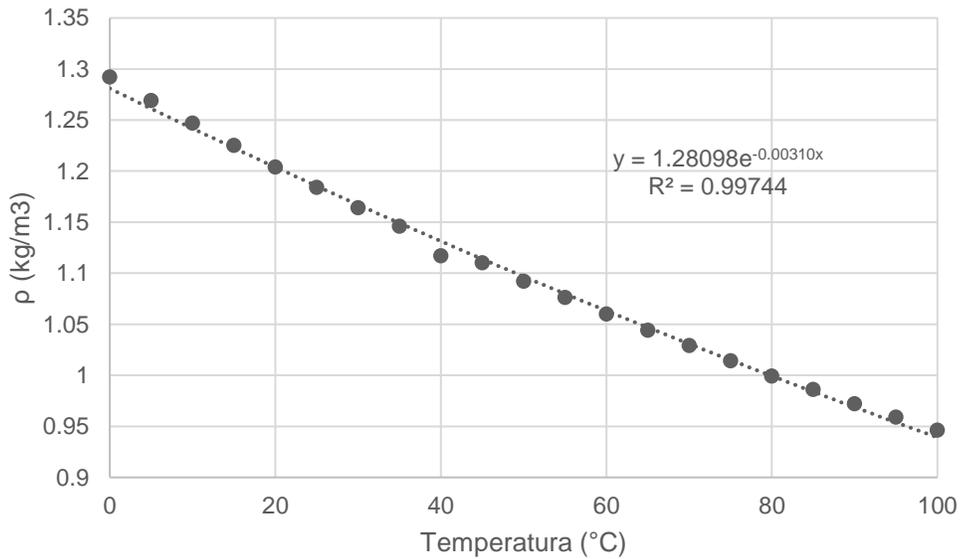


Figura 21. Densidad en función de la temperatura de 0 a 100°C (Coronel Toro & Perez-Lombard Martin de Oliva, 2016).

Metodología

Una vez construido el prototipo, el procedimiento utilizado para realizar la experimentación consistió primeramente en estimar el flujo másico de operación. Para realizarlo se utilizó el anemómetro de alambre caliente midiendo la velocidad del aire a la salida del colector solar en diferentes puntos, como se observa en la figura 22.

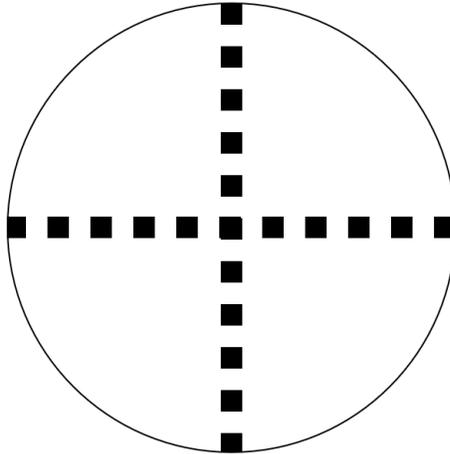


Figura 22. Sección transversal de la tubería de salida del colector solar mostrando los puntos de medición de la velocidad.

Esta prueba fue repetida a diferentes voltajes desde 5 V hasta 11 V. Con todos los datos obtenidos se obtuvo una velocidad promedio para cada caso, se multiplicó por el área de la tubería de salida dando como resultado el flujo volumétrico. Después estos valores se multiplican por la densidad calculada por la ecuación 6 y se obtiene el flujo másico con cada conjunto de datos obtenidos.

Una vez caracterizado el flujo, el equipo se instaló en el exterior para realizar las pruebas experimentales. Se le colocó un temporizador para su encendido y apagado automático, por las mañanas y al ocultarse el sol al anochecer respectivamente. Durante las primeras pruebas se mantuvo un voltaje de 7.5 V con un flujo de 20.5 kg/h aproximadamente. Después se puso a funcionar en el valor más bajo a 5 V por varios días. Posteriormente se aumentaba el voltaje y se mantenía por varios días. Se repitió este proceso hasta llegar a los 11 V, con un rango aproximado de 12.5 kg/h a 30.7 kg/h.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se logró construir un prototipo del calentador solar de aire con materiales reciclados y de bajo costo. Se reutilizaron la mayor cantidad de objetos posibles que se tenían al alcance. El componente principal del colector solar, los tubos evacuados, se tomaron de un calentador de agua; los soportes de madera se utilizaron de una mesa, las canaletas fueron sobrantes de otro proyecto, así como la turbina también reutilizada. La tubería de polipropileno, la tubería de acero inoxidable y la tubería Conduit para introducir el aire dentro de los tubos evacuados si fueron comprados.

En la primera fase de la experimentación se ajustó el voltaje de la fuente de potencia variable a 7.5 V dando un flujo másico de 20.5 kg/h. En esta primera fase se buscó analizar el comportamiento de los tubos evacuados con relación a la radiación solar recibida y evaluar el rendimiento obtenido por el equipo a través de las eficiencias. Los datos obtenidos en esta primera parte de las pruebas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Temperaturas del Aire de Entrada y de Salida, Diferencias de Temperatura, Radiación Total Recibida por día, Calor Absorbido por día y Eficiencia.*

| Fecha | Flujo Másico (kg/h) | T _{in} máx. (°C) | T _{out} máx. (°C) | ΔT máx. (°C) | Qu (MJ/día) | E (MJ/día) | Eficiencia (η) |
|------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|-------------|------------|----------------|
| 31/05/2017 | 20.65 | 38.01 | 80.90 | 45.29 | 7.90 | 13.18 | 59.90 |
| 01/06/2017 | 20.86 | 36.45 | 79.60 | 45.93 | 7.58 | 12.56 | 60.37 |
| 02/06/2017 | 20.73 | 38.03 | 79.20 | 45.11 | 7.88 | 13.07 | 60.33 |
| 03/06/2017 | 20.62 | 39.79 | 81.60 | 45.54 | 7.73 | 12.86 | 60.08 |
| 04/06/2017 | 20.56 | 40.54 | 81.00 | 44.35 | 7.68 | 12.81 | 60.00 |
| 05/06/2017 | 20.56 | 40.61 | 81.20 | 44.64 | 7.50 | 12.63 | 59.38 |
| 06/06/2017 | 20.59 | 41.88 | 81.90 | 44.74 | 7.21 | 12.64 | 57.00 |
| 07/06/2017 | 20.57 | 42.00 | 80.20 | 41.42 | 6.79 | 12.40 | 54.75 |
| 08/06/2017 | 20.50 | 42.85 | 82.40 | 43.75 | 7.03 | 12.36 | 56.90 |
| 09/06/2017 | 20.49 | 42.40 | 82.20 | 43.99 | 7.56 | 13.40 | 56.40 |

En estas condiciones de operación el desempeño del secador logró elevar la temperatura del aire hasta 45.9°C alcanzando temperaturas de salida superiores a 80°C . Es de destacarse que las condiciones de temperatura ambiental son altas alcanzando valores mayores a 40°C en sus valores máximos a lo largo del día, obteniendo eficiencias del 60%. La radiación solar presentada tiene en valores instantáneos que pueden llegar hasta los 1000 W/m^2 , por lo tanto, a lo largo de un día se obtuvo una energía de 12 MJ aproximadamente.

En las figuras 23 y 24 se presenta el comportamiento del equipo para dos días, uno con nublados apreciables en la línea de la radiación con caídas a valores bajos, el otro es un día completamente despejado.

En ambos casos las temperaturas de entrada van desde casi los 20°C hasta temperaturas un poco menores a los 40°C . Las temperaturas de salida en la figura 23 están un poco debajo de los 80°C por las oscilaciones de la radiación, aun así, alcanzaron valores altos superiores a los 1000 W/m^2 . En cambio, en la figura 24 se observa que se superaron los 80°C y por un lapso de algunas horas se estuvo muy cerca de esa temperatura, considerando una radiación constante con valores máximos de 900 W/m^2 . En los gradientes de temperatura en ambos casos se llegó hasta 45°C . Es de notarse que alrededor desde las 10 de la mañana durante 5 horas aproximadamente la diferencia de temperatura fue mayor a 40°C , en el caso del día nublado si baja de esa temperatura en algunas ocasiones debido a las fluctuaciones de la radiación.

Al obtener la eficiencia instantánea comparando el calor obtenido en cada minuto con la irradiancia en el área de los tubos evacuados y analizando su comportamiento durante el día. Se observa que en las primeras horas del día se tienen valores altos de eficiencia cuando la radiación es baja debido a la alta captación de energía de los tubos evacuados. Si bien con el paso del tiempo baja un poco, debido al aumento de la temperatura de operación, lo que provoca mayores pérdidas al ambiente, al final del día cuando se está metiendo el sol la eficiencia se dispara debido a la inercia térmica que lleva el equipo (Fig. 25).

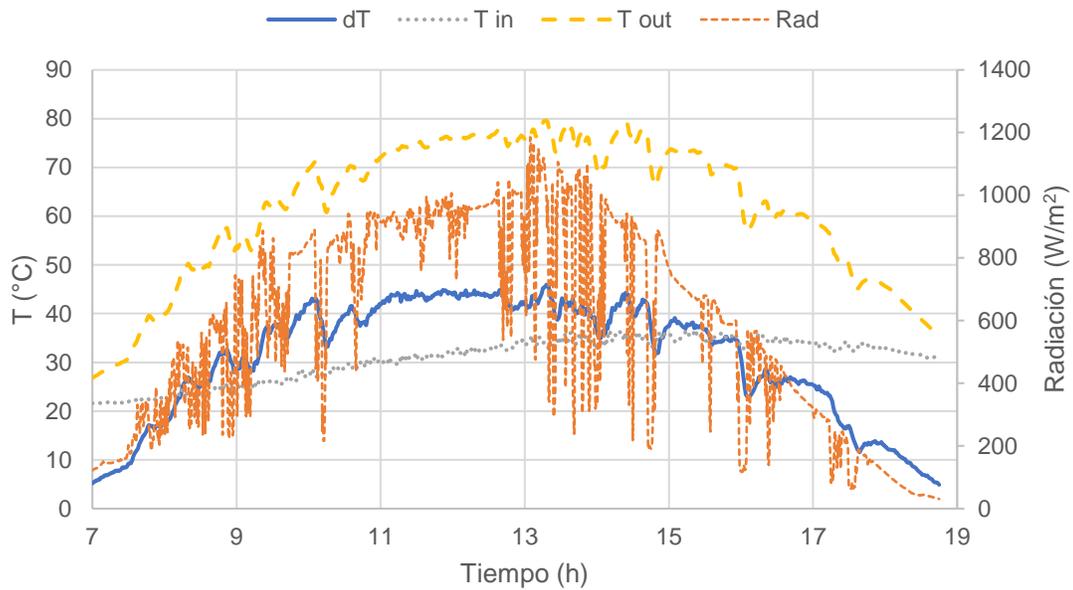


Figura 23. Temperaturas de Entrada, de Salida, Diferencia de Temperaturas y Radiación Presentadas a Flujo Constante de Aire el día 1/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h.

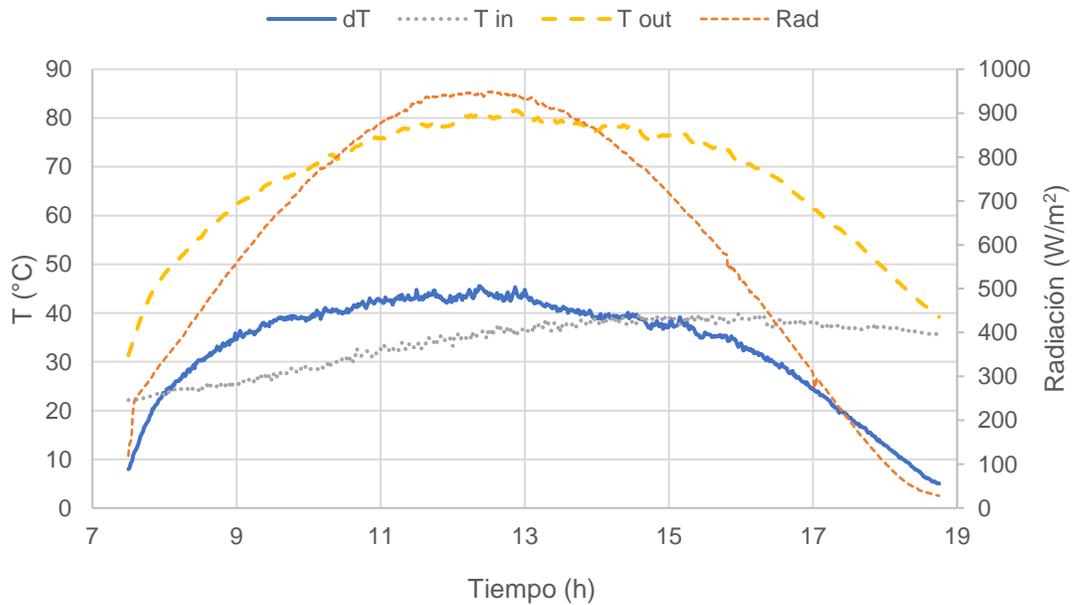


Figura 24. Temperaturas de Entrada, de Salida, Diferencia de Temperaturas y Radiación Presentadas a Flujo Constante de Aire el día 3/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h.

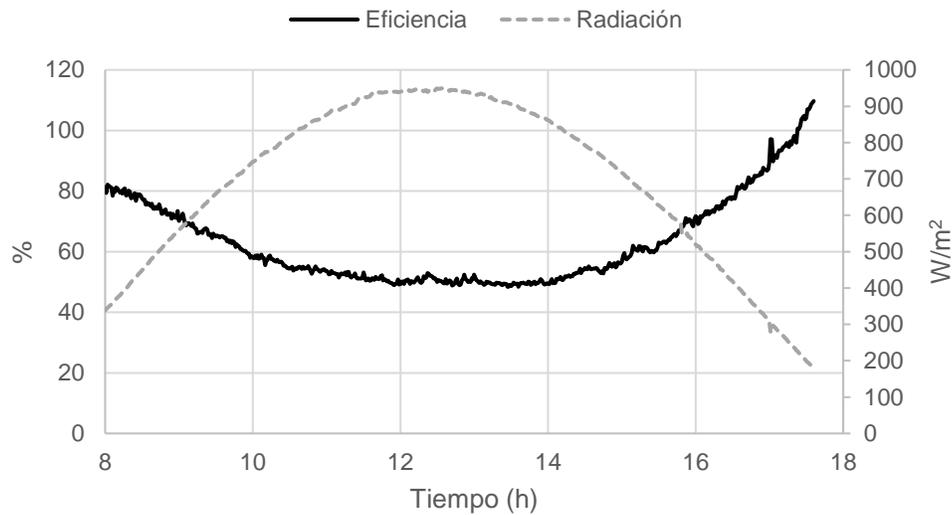


Figura 25. Cambio de la Eficiencia Instantánea y la Radiación con el Tiempo el día 3/Junio/2017 con un flujo de 20.5 kg/h.

En la segunda parte de la experimentación se varió el flujo desde 12.5 kg/h hasta 30.4 kg/h ajustando el voltaje desde 5 hasta 11 volts. Se midieron las velocidades con un anemómetro en diferentes puntos, se promediaron todos los valores obtenidos y se calculó el flujo volumétrico para cada uno de los voltajes. En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos para el flujo volumétrico y también se muestran los valores para el flujo másico. Este último dato se calculó utilizando un valor de la densidad de 1.1 kg/m³ que corresponde al promedio de los valores de la densidad obtenidos en la experimentación.

Tabla 3. Flujo Volumétrico y Másico para cada voltaje utilizado.

| Voltaje | Flujo volumétrico (m ³ /s) | Flujo másico (kg/h) |
|---------|---------------------------------------|---------------------|
| 5 | 0.00331929 | 13.2547754 |
| 6 | 0.00407695 | 16.2803219 |
| 7 | 0.00494285 | 19.7380894 |
| 8 | 0.00523149 | 20.8906786 |
| 9 | 0.00624171 | 24.9247407 |
| 10 | 0.00696329 | 27.8062136 |
| 11 | 0.00762955 | 30.4667747 |

En la figura 26 se muestra la tendencia de cambio del flujo másico con respecto a la variación del voltaje proporcionado por la fuente de potencia. Se observa que la razón de cambio es lineal y se incrementa en casi 3 kg/h con cada unidad de voltaje. La turbina soporta trabajar hasta con 12 V, lo que correspondería a tener un flujo de 33.3 kg/h.

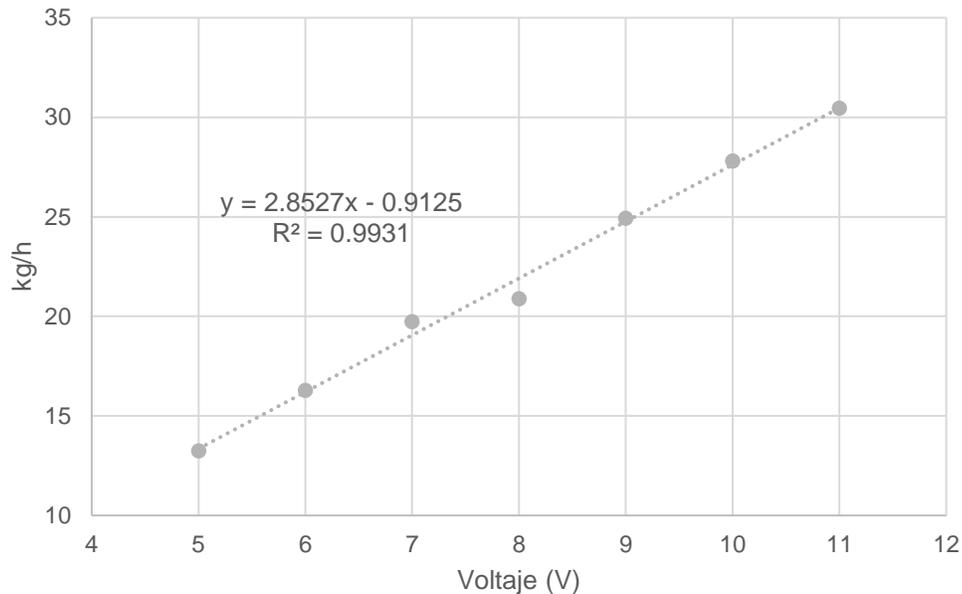


Figura 26. Variación del Flujo Másico con respecto al voltaje.

De los resultados obtenidos se hizo un muestreo de la parte del día donde se obtuvieron los mejores resultados, los cuales fueron promediados para un tiempo entre las 13:00 y 13:30 horas.

Estos datos se muestran en la tabla 4. En este espacio se tuvieron los valores más altos de la temperatura de aire de salida, así como las diferencias de temperatura mayores con respecto a las condiciones de entrada. A partir de ahí se calcularon otros parámetros para conocer el desempeño del calentador.

Los datos presentados son las temperaturas de entrada, de salida, temperatura promedio en el sistema, gradiente de temperatura, calor absorbido, irradiancia y eficiencia en ese lapso. Las temperaturas de entrada rondaron entre los 35°C y 38°C, que son considerados valores altos de temperatura ambiental, sin embargo, el sistema fue capaz de elevar la temperatura del aire hasta 53.5°C cuando se operó con el flujo

más bajo de 12.5 kg/h, con 19.2 kg/h fue de 45.5°C y con 30.1 kg/h de 30.2°C. Las temperaturas de salida fueron de 91.5°C, 81.4°C y 65.1°C respectivamente. Con esta información se observa que el gradiente de temperatura disminuye conforme se aumenta el flujo, lo que se ve reflejado directamente en la temperatura de salida.

En el caso del calor absorbido se ve que aumenta conforme se eleva el flujo másico; con 12.5 kg/h se obtuvieron 187.7 W, con 19.2 kg/h 242.2 W y con 30.1 kg/h 255 W. Los valores de la irradiancia rondaron desde los 860 W/m² en sus valores más bajos hasta casi los 1000 W/m² en los más altos. Al comparar el calor absorbido con estos datos sobre el área del colector solar resulto que la eficiencia crece conforme aumenta el flujo másico. Para 12.5 kg/h se tiene el 38.8%, para 19.2 kg/h se obtuvo 48.5% y para el flujo más alto se llegó hasta el 57.2% de eficiencia. La radiación menor se presentó a flujos altos y aun así se elevó bastante la temperatura, en igualdad de condiciones con valores superiores a 900 W/m² debería tenerse una temperatura un poco más elevada a la presentada.

Tabla 4. Temperaturas del aire de entrada, de salida, temperatura promedio del aire, gradiente de temperatura, calor absorbido y eficiencia a diferentes flujos másicos.

| Voltaje | Flujo másico (kg/h) | T _{in} (°C) | T _{out} (°C) | T _{prom} (°C) | ΔT (°C) | Q (W) | I (W/m ₂) | Eficiencia |
|---------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|-----------------------|------------|
| 5 | 12.547 | 38.004 | 91.577 | 64.790 | 53.573 | 187.686 | 937.733 | 38.858 |
| 6 | 16.665 | 20.883 | 59.556 | 40.219 | 38.673 | 179.288 | 999.067 | 34.841 |
| 7 | 19.280 | 35.843 | 81.403 | 58.623 | 45.560 | 242.164 | 969.267 | 48.506 |
| 9 | 24.029 | 40.073 | 78.220 | 59.147 | 38.147 | 255.633 | 943.867 | 52.582 |
| 10 | 27.140 | 38.520 | 71.030 | 54.775 | 32.510 | 246.283 | 883.867 | 54.098 |
| 11 | 30.112 | 34.903 | 65.175 | 50.039 | 30.271 | 254.858 | 864.973 | 57.204 |

En las siguientes gráficas (Fig. 27 y 28) se muestra el comportamiento del calentador de aire a dos flujos másicos distintos, el primero es al flujo más bajo de operación, 12.5 kg/h y la siguiente el más alto, 30.1 kg/h. En ambos casos las temperaturas de entrada andan en valores muy cercanos yendo por debajo de los 30°C hasta los 40°C a lo largo del día. En cuestión de la irradiancia los valores son similares llegando casi a los 1000 W/m² cerca del mediodía, sin embargo, en el día con el flujo másico alto hay más variaciones

en la radiación por la presencia de nubes y que esto se ve reflejado en fluctuaciones en la temperatura de salida, en el otro caso se tuvo mayor constancia en ese aspecto.

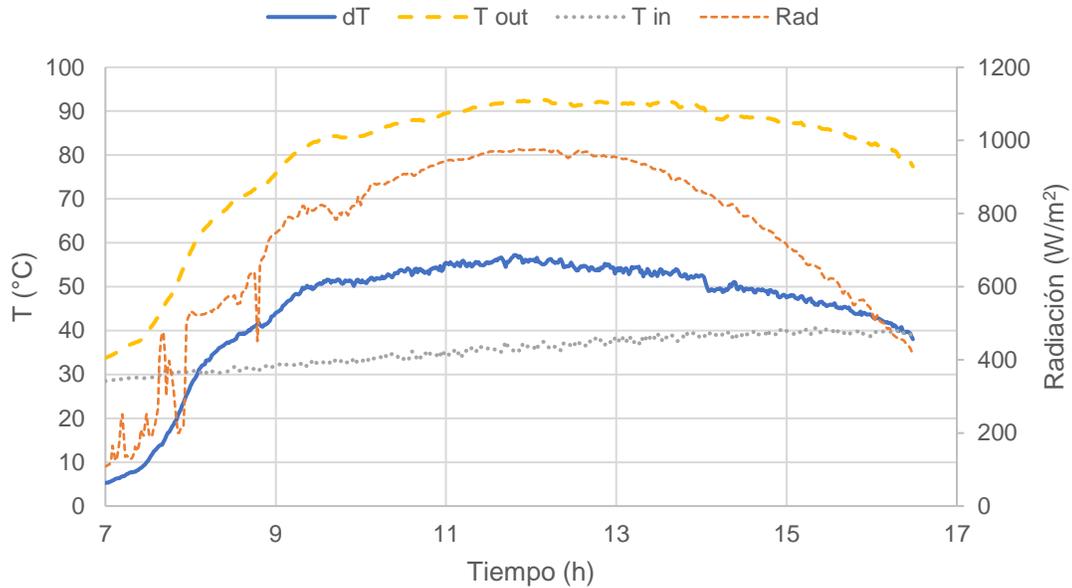


Figura 27. Temperaturas de entrada, de salida, diferencia de temperaturas y radiación presentadas a flujo constante de aire el día 10/Julio/2017 con un flujo de 12.5 kg/h.

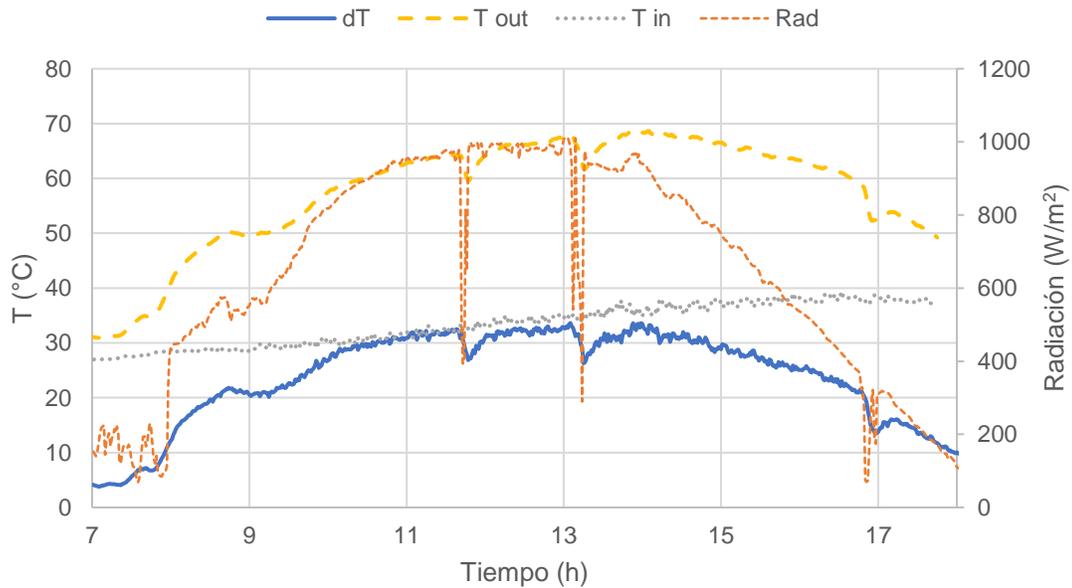


Figura 28. Temperaturas de entrada, de salida, diferencia de temperaturas y radiación presentadas a flujo constante de aire el día 13/Julio/2017 con un flujo de 30.1 kg/h.

Al comparar las condiciones del aire de salida, la diferencia de las temperaturas es más grande cuando se tiene un flujo bajo, de igual manera, la tasa de crecimiento para el gradiente de temperatura es mayor. Una diferencia de 30°C se obtuvo alrededor de las 8:00 AM, mientras que, con el flujo alto esa misma diferencia se alcanzó hasta las 11:00 AM. Los gradientes más altos obtenidos fueron cerca de 55°C y 32°C para los flujos de 12.5 kg/h y 30 kg/h respectivamente.

Las temperaturas de salida para el primer caso superaron los 80°C durante 7 horas aproximadamente y por un par de horas los valores superaron los 90°C. En el otro caso por casi 5 horas se obtuvieron temperaturas superiores a 60°C y en un momento estuvieron muy cercanas a los 70°C. Con las características de este colector solar se pueden obtener diferencias de temperatura desde 32°C a 55°C para obtener temperaturas de salida de 60°C hasta 90°C. Esto nos permite ajustar el flujo másico para obtener la temperatura del aire requerida.

Al analizar la eficiencia instantánea como se hizo en la figura 25 para la primera fase, ahora se presenta el mismo análisis para un flujo de 24 kg/h (Fig. 29). Se observa que se tiene el mismo comportamiento con un ligero descenso en la eficiencia debido al aumento de la temperatura de operación y después va en aumento a lo largo del día empezando a crecer exponencialmente cuando va reduciendo la irradiancia al ocultarse el sol. De igual manera se superan los valores del 100% porque la inercia térmica permite seguir aportando calor al aire.

Retomando la información presentada en la tabla 4, la eficiencia aumenta junto con el flujo másico. La tendencia de cambio que se presenta es lineal como se observa en la figura 30. De este modo, la gráfica nos indica que con cada kilogramo de aire por hora que se aumente al sistema la eficiencia aumentará en 1.2%.

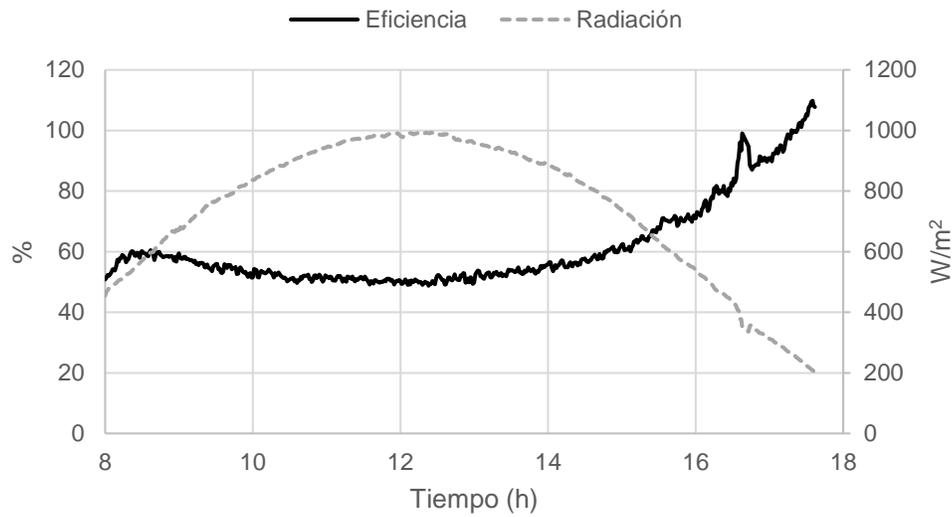


Figura 29. Cambio de la Eficiencia Instantánea y la Radiación con el Tiempo el día 7/Julio/2017 con un flujo de 24.4 kg/h.

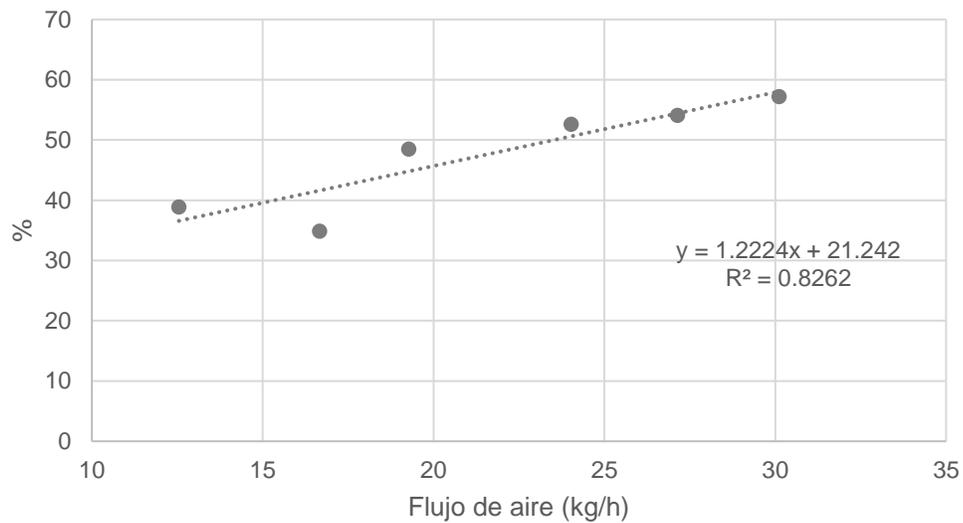


Figura 30. Eficiencia del sistema contra el flujo másico en un lapso de media hora al medio día.

Las eficiencias mostradas anteriormente consideran un pequeño lapso significativo, sin embargo, se quiere conocer que tanto puede cambiar el desempeño del equipo al analizar todo un día de operación. Para ello se obtuvo la energía total recibida y el calor útil total en un día completo para los diferentes flujos másicos y posteriormente se obtuvo su eficiencia global (Tabla 5).

Tabla 5. Eficiencia global por día a diferentes flujos másicos.

| Flujo másico (kg/h) | Qu (MJ/día) | E (MJ/día) | Eficiencia Global |
|------------------------|----------------|---------------|----------------------|
| 12.547 | 5.338 | 12.739 | 41.90 |
| 16.665 | 4.830 | 12.493 | 38.66 |
| 19.280 | 5.855 | 10.489 | 55.82 |
| 24.029 | 8.135 | 13.958 | 58.28 |
| 27.140 | 7.538 | 12.443 | 60.58 |
| 30.112 | 8.319 | 13.553 | 61.38 |

Al analizar estos datos y graficándolos (Fig. 31) se observa que se mantiene la tendencia lineal como se muestra en la figura anterior, solo que en este caso los valores de las eficiencias aumentaron un poco y se ajustaron pasando del 60%. De aquí podemos decir que a flujos altos se presentan los mayores valores de eficiencias debido a que las pérdidas de calor con el ambiente son menores. A flujos bajos se obtienen mayores temperaturas y ello facilita la transferencia de calor al ambiente, lo que se representa en pérdidas mayores y menores eficiencias.

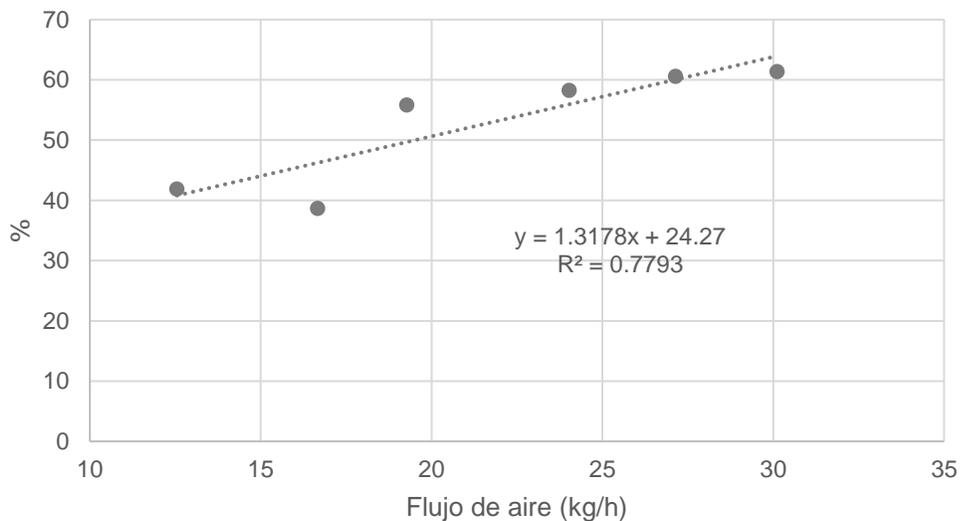


Figura 31. Eficiencia global del sistema contra el flujo másico.

El equipo tiene eficiencias entre el 40% y el 60% lo que indica que prácticamente se aprovecha la mitad de la energía recibida del sol, la cual puede ser un poco mayor o menor según el flujo al que se esté trabajando.

Uno de los aspectos más importantes de un calentador solar para secado es la temperatura a la que proporciona al aire para dicho proceso. En este caso vemos que para radiaciones superiores a los 900 W/m^2 se puede elevar la temperatura por encima de los 90°C o alrededor de los 60°C . Dentro de este rango se encuentran otras temperaturas que se pueden obtener siguiendo una tendencia lineal demostrado en la figura 32 disminuyendo un poco más de un grado por cada kilogramo por hora aumentado. Esta simplicidad permite un control más sencillo del equipo para poder definir la temperatura requerida.

El estudio se realizó desde 12.5 kg/h hasta 30.1 kg/h , no obstante, ese rango se puede ampliar hasta 33.3 kg/h , que es lo máximo soportado por la turbina. En el otro extremo no se tienen restricciones y se puede disminuir aún más el flujo, lo que abre la posibilidad de seguir elevando la temperatura de salida hasta por encima de los 100°C .

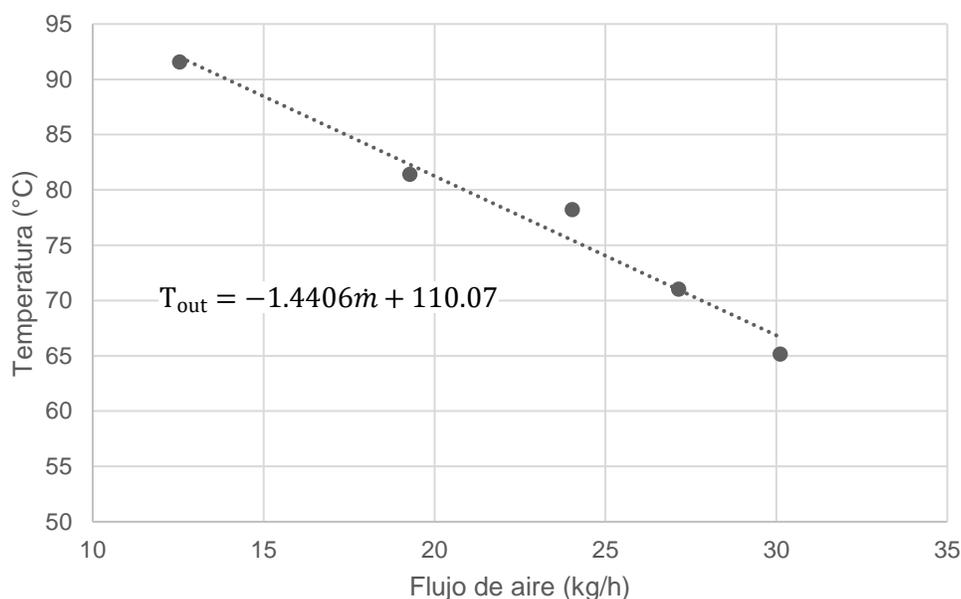


Figura 32. Variación de las temperaturas de salida del aire con respecto al cambio del flujo másico.

Este análisis demuestra que el comportamiento de la temperatura de salida sigue una tendencia lineal con respecto al flujo másico de operación, sin embargo, el principal parámetro que determina la temperatura de salida es la radiación solar.

En la figura 33 se muestra la eficiencia instantánea del colector solar con respecto a las variaciones que se pueden presentar en las condiciones ambientales, tomando en cuenta las diferencias de temperatura con el ambiente y la radiación presentada. El modelo se ajusta a lo esperado, entre mayor sea la temperatura del colector con respecto a la del exterior tendrá mayores pérdidas de calor, lo que se representa con menores valores de la eficiencia. La ecuación obtenida para este sistema es:

$$\eta = 0.496 + 11.262 \frac{T_m - T_a}{I} - 511.73 \frac{(T_m - T_a)^2}{I}$$

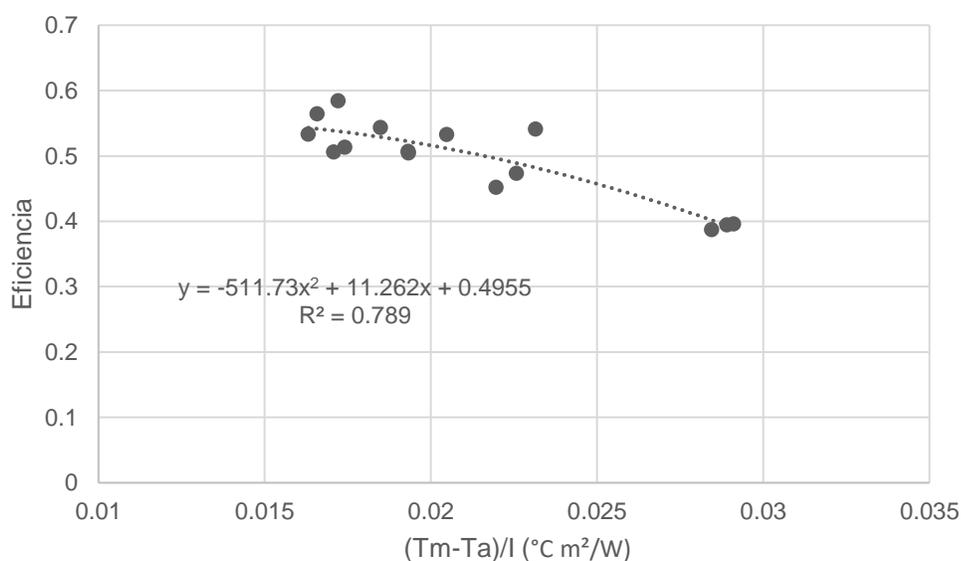


Figura 33. Eficiencia Global del Colector Solar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se construyó un calentador de aire solar utilizando tubos evacuados el cual fue instrumentado para su estudio. El colector resulta económico, fácil de operar y con buenas eficiencias de operación.

A diferencia de otros secadores solares las utilizations de los tubos evacuados tienen la ventaja de permitir entregar aire a temperaturas considerablemente altas de 90°C e inclusive con la posibilidad de llegar a valores superiores a los 100°C.

Con la primera campaña de experimentación fue posible determinar el potencial que tiene el equipo para calentar aire. Se verificó que fuera funcional y viable ya que presento buenos resultados elevando la temperatura del aire hasta 45°C con radiaciones entre los 900 y 1000 W/m² y presentando eficiencias cercanas al 60%.

Con la segunda campaña de experimentación se estudió las temperaturas a las que puede funcionar el calentador para proporcionar aire caliente a partir de los 65°C hasta 90°C, para altos flujos y para bajos flujos respectivamente. En los valores máximos de radiación superiores a los 900 W/m² se observó que se puede operar a la temperatura máxima alcanzada por el lapso de algunas horas, a flujos altos se mantuvo la temperatura arriba de 60°C por unas 4 horas y a flujos bajos por 3 horas se estuvo arriba de los 90°C.

Las eficiencias observadas tienen valores entre 40% para flujos bajos y 60% para flujos altos, en promedio se aprovecha la mitad de la radiación solar. Para flujos más altos se aprovecha mejor porque se tienen menos pérdidas con el ambiente, como en el caso contrario de flujos bajos que son mayores.

En el caso de la temperatura de salida del aire se demostró que se tiene una relación lineal con respecto al flujo másico utilizado, no obstante, no es posible establecer una

ecuación que defina este comportamiento porque el principal factor que delimita la temperatura de salida es la radiación solar.

Estos resultados permiten avanzar en la investigación y en el diseño de nuevos equipos para calentamiento de aire para secado de mayores capacidades dependiendo del uso que se le dé. Pueda ser posible que se requieran temperaturas menores, pero con un número no muy grande de tubos evacuados se pueden tener grandes cantidades de aire a la temperatura requerida.

Los tubos evacuados presentan ventajas sobre los colectores solares convencionales, debido a que es posible obtener mayores temperaturas de operación sin la necesidad de un sistema de concentración solar.

La sencilla variación de la temperatura de salida, únicamente cambiando la alimentación de aire permite el diseño de secadores multiusos para que puedan utilizarse en varios productos como verduras, frutas, granos, maderas o cerámicas.

Esta misma característica abre la posibilidad a un control simple del equipo que manipule electrónicamente el sistema de alimentación al estar monitoreando y corrigiendo el flujo para obtener siempre la misma temperatura en el aire de salida, aumentando o disminuyendo su valor de manera sencilla.

Recomendaciones

Una posible modificación para aumentar tanto las eficiencias como la temperatura de salida es aislar térmicamente el sistema donde se transporta el aire, la tubería de polipropileno. Al reducir las pérdidas de calor al ambiente se tendrá un mejor aprovechamiento de la energía recibida.

Se recomienda el uso de materiales de almacenamiento térmico, por ejemplo, los que presentan cambio de fase, para extender el tiempo de operación del equipo. Con la incorporación de estos materiales en el colector solar, se permite seguir aportando calor al aire durante varias horas más.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd-Elhady, M., Nasreldin, M., & Elsheikh, M. (2017). Improving the performance of evacuated tube heat pipe collectors using oil and foamed metals. *Ain Shams Engineering Journal*, 1-5.

Bohorquez Colombo, A. (2013). *La Energía Solar Térmica*. Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo, Centro de Innovación Energética: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/4252/Solar_Thermal_Energy_SPA_final.pdf?sequence=2

Collier, U. (2018). *Renewable heat policies, Delivering clean heat solutions for the energy transition*. International Energy Agency.

Coronel Toro, J. F., & Perez-Lombard Martin de Oliva, L. (2016). *Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*. Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla.

El-Sebaei, A., & Shalaby, S. (2012). Solar drying of agricultural product: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 37-43.

Energía solar térmica de alta temperatura. (21 de Mayo de 2015). Obtenido de Energía Solar: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>

Energía solar térmica de baja temperatura. (24 de Abril de 2015). Obtenido de Energía Solar: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/baja-temperatura>

Energía solar térmica de media temperatura. (18 de Abril de 2018). Obtenido de Energía Solar: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/media-temperatura>

Engineering ToolBox. (2005). *Dry Air Properties*. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html

Estrada Gasca, C. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física*, 75-84.

Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M., Alghoul, M., & Sulaiman, M. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-30.

Garcia Sanchez, S. (Enero de 2014). *Analisis de Sensibilidad como Medio para la Optimizacion de un Sistema Solar para Calentamiento de Agua*. Obtenido de UNAM Programa de Estudios de Maestria y Doctorado en Ingenieria: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7132/tesis.pdf?sequence=1>

Genersys. (2003). *Collector test according to EN 12975-1,2*. Fraunhofer: Institut Solare Energiesysteme.

Global Solar Atlas. (2018). Obtenido de World Bank Group: <http://globalsolaratlas.info/downloads/world>

Hayek, M., Assaf, J., & Lteif, W. (2011). Experimental Investigation of the Performance of Evacuated Tube Solar Collectors under Eastern Mediterranean Climatic Conditions. *Energy Procedia*, 6, 618-626.

Industrias JQ. (2016). Obtenido de Polipropileno Datos Tecnicos: <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/polipropileno/poliprop/dtecnicos.htm>

Kalogirou, S. (2004). Solar Thermal Collectors and Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231-295.

Kumar, A., Kumar, S., Nagar, U., & Yadav, A. (2013). Experimental Study of Thermal Performance of One-Ended Evacuated Tubes for Producing Hot Air . *Journal of Solar Energy*, 1-6.

Lorente, J. (n.d.). *La radiacion solar*. Obtenido de Curso de fotoproteccion: <http://www.portalfarma.com/Profesionales/campanaspf/categorias/Documents/MAQUETACION%20MATERIAL%20FORMATIVO%20fotoproteccionfotproc2010.pdf>

Maier, D., & Bakker-Arkema, F. (28-31 de July de 2002). *Grain Drying Systems*. Obtenido de GEAPS FDC: <https://fyi.uwex.edu/energy/files/2016/09/Grain-drying-Systems-GEAPS-2002-secured.pdf>

- Reda, F. (2017). Solar Thermal Collectors. En *Solar Assisted Ground Source Heat Pump Solutions* (págs. 9-17). Springer Briefs.
- Reeb, J. (1997). Drying Wood. *Cooperative Extension Service, University of Kentucky*, 1-5.
- REN21. (2016). *Renewables 2016 Global Status Report*. Paris: REN21.
- Romero, M. (2012). *Fuentes renovables de energia*. Obtenido de Energia 2012: <http://www.energia2012.es/sobre-energ%C3%ADa/fuentes-renovables-de-energ%C3%ADa>
- SENER. (2016). *Programa de Desarrollo del Sistema Electrico Nacional 2016-2030 PRODESEN*. Mexico: Secretaria de Energia. Obtenido de Programa de Desarrollo del Sistema Electrico Nacional 2016-2030 PRODESEN.
- SENER. (2017). *Prospectiva del Sector Electrico 2017-2031*. Mexico: Secretaria de Energia.
- Sharma, A., Chen, C., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1185-1210.
- SolEnergy. (2010). Obtenido de Paneles Solares, Celdas Solares: <https://solenergy.mx/es/paneles-solares>
- Sustainability Victoria. (2010). *Large Scale Solar Thermal Systems Designs Handbook*. Australia: Master Plumbers' and Mechanical Services Association of Australia.
- Treybal, R. (1980). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mexico: McGraw-Hill.
- Tyagi, V., Pandey, A., Kaushik, S., & Tyagi, S. (2012). Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage, An experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1345-1352.
- Yadav, A., & Bajpai, V. (2011). An Experimental Study on Evacuated Tube Solar Collector for Heating of Air in India. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 1188-1193.

ANEXO A

Tabla 6. Temperatura máxima soportada de diferentes cultivos (Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009).

| Cultivo | Temperatura máxima |
|---------------------|--------------------|
| Arrozal, crudo | 50 |
| Arrozal, sancochado | 50 |
| Maíz, planta | 60 |
| Trigo | 45 |
| Maíz | 50 |
| Arroz | 50 |
| Legumbres | 50 |
| Semilla de aceite | 60 |
| Chicharos | 65 |
| Coliflor | 65 |
| Zanahorias | 75 |
| Ejotes | 75 |
| Cebollas | 55 |
| Ajo | 55 |
| Repollo | 55 |
| Camote | 75 |
| Papas | 75 |
| Chiles | 65 |
| Manzanas | 70 |
| Albaricoque | 65 |
| Uvas | 70 |
| Plátanos | 70 |
| Guayabas | 65 |
| Okra | 65 |
| Piña | 65 |
| Tomates | 60 |
| Berenjena | 60 |

Tabla 7. Propiedades del aire seco a presión atmosférica (Coronel Toro & Perez-Lombard Martin de Oliva, 2016).

| T (°C) | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg·K) | $\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²) | $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s) | $k \cdot 10^3$ (W/m·K) | $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s) | Pr |
|-----------|--------------------------------|--------------------|---|---|---------------------------|--|--------|
| -150 | 2.867 | 0.982 | 8.64 | 3.013 | 11.71 | 4.157 | 0.7246 |
| -100 | 2.039 | 0.965 | 11.90 | 5.835 | 15.82 | 8.034 | 0.7263 |
| -90 | 1.927 | 0.975 | 12.49 | 6.482 | 16.62 | 8.842 | 0.7330 |
| -80 | 1.828 | 0.983 | 13.07 | 7.153 | 17.42 | 9.692 | 0.7381 |
| -70 | 1.738 | 0.990 | 13.64 | 7.850 | 18.22 | 10.59 | 0.7414 |
| -60 | 1.656 | 0.995 | 14.20 | 8.572 | 19.01 | 11.53 | 0.7433 |
| -50 | 1.582 | 0.999 | 14.74 | 9.317 | 19.79 | 12.52 | 0.7440 |
| -40 | 1.514 | 1.002 | 15.27 | 10.08 | 20.57 | 13.56 | 0.7436 |
| -30 | 1.452 | 1.004 | 15.79 | 10.88 | 21.34 | 14.65 | 0.7425 |
| -20 | 1.394 | 1.005 | 16.30 | 11.69 | 22.11 | 15.78 | 0.7408 |
| -10 | 1.341 | 1.006 | 16.80 | 12.52 | 22.88 | 16.96 | 0.7387 |
| 0 | 1.292 | 1.006 | 17.29 | 13.38 | 23.64 | 18.17 | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1.006 | 17.54 | 13.82 | 24.01 | 18.80 | 0.7350 |
| 10 | 1.247 | 1.006 | 17.78 | 14.26 | 24.39 | 19.44 | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1.007 | 18.02 | 14.71 | 24.76 | 20.08 | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1.007 | 18.25 | 15.16 | 25.14 | 20.74 | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1.007 | 18.49 | 15.61 | 25.51 | 21.40 | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1.007 | 18.72 | 16.08 | 25.88 | 22.08 | 0.7282 |
| 35 | 1.146 | 1.007 | 18.95 | 16.54 | 26.25 | 22.76 | 0.7268 |
| 40 | 1.117 | 1.007 | 19.18 | 17.02 | 26.62 | 23.45 | 0.7255 |
| 45 | 1.110 | 1.007 | 19.41 | 17.49 | 26.99 | 24.16 | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1.007 | 19.63 | 17.97 | 27.35 | 24.87 | 0.7228 |
| 55 | 1.076 | 1.007 | 19.86 | 18.46 | 27.72 | 25.59 | 0.7215 |
| 60 | 1.060 | 1.007 | 20.08 | 18.95 | 28.08 | 26.31 | 0.7202 |
| 65 | 1.044 | 1.007 | 20.30 | 19.45 | 28.45 | 27.05 | 0.7190 |
| 70 | 1.029 | 1.007 | 20.52 | 19.95 | 28.81 | 27.79 | 0.7177 |
| 75 | 1.014 | 1.008 | 20.74 | 20.45 | 29.17 | 28.55 | 0.7166 |
| 80 | 0.999 | 1.008 | 20.96 | 20.97 | 29.53 | 29.31 | 0.7154 |
| 85 | 0.986 | 1.008 | 21.17 | 21.48 | 29.88 | 30.07 | 0.7143 |
| 90 | 0.972 | 1.008 | 21.39 | 22.00 | 30.24 | 30.85 | 0.7132 |
| 95 | 0.959 | 1.009 | 21.60 | 22.52 | 30.60 | 31.63 | 0.7121 |
| 100 | 0.946 | 1.009 | 21.81 | 23.05 | 30.95 | 32.42 | 0.7111 |
| 110 | 0.921 | 1.010 | 22.23 | 24.12 | 31.65 | 34.02 | 0.7092 |
| 120 | 0.898 | 1.011 | 22.64 | 25.21 | 32.35 | 35.64 | 0.7073 |
| 130 | 0.876 | 1.012 | 23.05 | 26.32 | 33.05 | 37.30 | 0.7057 |
| 140 | 0.854 | 1.013 | 23.45 | 27.44 | 33.74 | 38.98 | 0.7041 |
| 150 | 0.834 | 1.014 | 23.85 | 28.59 | 34.43 | 40.68 | 0.7027 |
| 160 | 0.815 | 1.016 | 24.24 | 29.74 | 35.11 | 42.40 | 0.7014 |
| 170 | 0.797 | 1.017 | 24.63 | 30.92 | 35.79 | 44.15 | 0.7003 |
| 180 | 0.779 | 1.019 | 25.01 | 32.11 | 36.46 | 45.92 | 0.6992 |
| 190 | 0.762 | 1.021 | 25.39 | 33.32 | 37.13 | 47.71 | 0.6983 |
| 200 | 0.746 | 1.023 | 25.77 | 34.54 | 37.79 | 49.53 | 0.6974 |
| 210 | 0.7306 | 1.025 | 26.14 | 35.78 | 38.45 | 51.36 | 0.6967 |
| 220 | 0.7158 | 1.027 | 26.51 | 37.04 | 39.10 | 53.21 | 0.6960 |
| 230 | 0.7016 | 1.029 | 26.88 | 38.31 | 39.75 | 55.08 | 0.6955 |
| 240 | 0.6879 | 1.031 | 27.24 | 39.60 | 40.40 | 56.97 | 0.6950 |
| 250 | 0.6748 | 1.033 | 27.60 | 40.90 | 41.04 | 58.88 | 0.6946 |
| 260 | 0.6621 | 1.035 | 27.95 | 42.22 | 41.67 | 60.81 | 0.6942 |
| 270 | 0.6499 | 1.037 | 28.30 | 43.55 | 42.31 | 62.75 | 0.6940 |
| 280 | 0.6382 | 1.040 | 28.65 | 44.90 | 42.93 | 64.72 | 0.6938 |
| 290 | 0.6269 | 1.042 | 29.00 | 46.26 | 43.56 | 66.69 | 0.6936 |
| 300 | 0.6159 | 1.044 | 29.34 | 47.64 | 44.18 | 68.69 | 0.6935 |

Tabla 8. Calor específico del aire a diferentes temperaturas (Engineering ToolBox, 2005).

| Temperatura (°C) | C _p (kJ/kgK) | C _v (kJ/kgK) | Temperatura (°C) | C _p (kJ/kgK) | C _v (kJ/kgK) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| -98 | 1.0023 | 0.7152 | 527 | 1.0987 | 0.8116 |
| -73 | 1.0025 | 0.7154 | 577 | 1.1101 | 0.823 |
| -48 | 1.0027 | 0.7156 | 627 | 1.1209 | 0.8338 |
| -23 | 1.0031 | 0.716 | 677 | 1.1313 | 0.8442 |
| 2 | 1.0038 | 0.7167 | 727 | 1.1411 | 0.854 |
| 27 | 1.0049 | 0.7178 | 777 | 1.1502 | 0.8631 |
| 52 | 1.0063 | 0.7192 | 827 | 1.1589 | 0.8718 |
| 77 | 1.0082 | 0.7211 | 877 | 1.167 | 0.8799 |
| 102 | 1.0106 | 0.7235 | 927 | 1.1746 | 0.8875 |
| 127 | 1.0135 | 0.7264 | 977 | 1.1817 | 0.8946 |
| 177 | 1.0206 | 0.7335 | 1027 | 1.1884 | 0.9013 |
| 227 | 1.0295 | 0.7424 | 1077 | 1.1946 | 0.9075 |
| 277 | 1.0398 | 0.7527 | 1127 | 1.2005 | 0.9134 |
| 327 | 1.0511 | 0.764 | 1227 | 1.2112 | 0.9241 |
| 377 | 1.0629 | 0.7758 | 1327 | 1.2207 | 0.9336 |
| 427 | 1.075 | 0.7879 | 1427 | 1.2293 | 0.9422 |
| 477 | 1.087 | 0.7999 | 1527 | 1.237 | 0.9499 |
| | | | 1627 | 1.244 | 0.9569 |