



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN**

**Diseño, construcción y evaluación de la eficiencia de  
un generador de vapor solar, para obtener las  
condiciones óptimas para GDV**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA:**

**Carlos Iván Hernández Carreón**

**Asesor: Dr. Julio César Morales Mejía**

**CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis y Examen Profesional.**

**Diseño, construcción y evaluación de la eficiencia de un generador de vapor solar.**

Que presenta el pasante: **Carlos Iván Hernández Carreón**  
Con número de cuenta: **415065210** para obtener el título de: **Ingeniero Químico**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de mayo de 2023.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I.Q. María Elena Quiroz Macías	
<b>VOCAL</b>	M.E. y M.I Ana María Soto Bautista	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Julio César Morales Mejía	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.Q. Miguel Ángel García Campos	
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.Q. Guillermo Martínez Morua	

NOTA: Los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.  
En caso de que algún miembro del jurado no pueda asistir al examen profesional deberá dar aviso por anticipado al departamento.

MCVB/rga\*

## AGRADECIMIENTOS

UNAM: A la universidad nacional autónoma de México por brindarme la educación y todos los conocimientos para mi desarrollo personal y profesional, estoy agradecido con la gran institución que es y por todo el apoyo que nos da como estudiantes.

FESC: La facultad de estudios superiores Cuautitlán, agradezco los 4 años y medio que estudié y me desarrollé como persona, conocí grandes personas y me llevo buenos amigos y agradecido con todos los maestros que me brindaron sus conocimientos.

UNAM/DGAPA, PROYECTO PAPIME: Gracias por el apoyo para el desarrollo del proyecto.

## DEDICATORIAS

A mi madre: Ma. Teresa por su gran apoyo durante toda mi vida, por creer en mí y por enseñarme que con esfuerzo todo es posible. Esto también es tuyo mamá, gracias por enseñarme que debo ser feliz haciendo lo que me gusta, muchas gracias, mamá.

A mi padre: Juan Carlos por todo su apoyo durante mis estudios, por todas las enseñanzas que me brindas en todos los aspectos de la vida, gracias.

A mi hermana: Karla por todo el apoyo que me brindo desde que éramos pequeños, por estar siempre que lo necesito, gracias, hermana.

A mi sobrina: Romina eres muy pequeña, pero me gusta crecer y aprender contigo, cuando seas más grande sé que la vas a leer y me gustaría que seas una gran profesional, pero sobre todo un buen ser humano.

A mi asesor: Dr. Julio Cesar Morales Mejía, por ser un extraordinario ser humano y un excelente profesor, por su infinita comprensión durante la pandemia y por siempre tener la disponibilidad para guiarme durante el proyecto, sin su valiosa ayuda y su amplio conocimiento no se hubiera logrado concluir el proyecto. Muchas Gracias.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	12
1.1 Clasificación de las energías renovables y tecnología solar en México.....	12
1.1.1 Irradiación solar.....	17
1.1.2 Irradiación directa y difusa diaria mensual en una superficie horizontal.....	19
1.2 Calidad del agua para la generación de vapor.....	20
1.2.1 Tipos, propiedades físicas y dureza.....	21
1.2.2 Principales fuentes de abastecimiento para equipos generadores de vapor.....	23
1.2.3 Acondicionamiento agua para uso en equipos generadores de vapor.....	26
1.3 Vapor de baja presión y tecnologías principales para su generación.....	30
1.3.1 Ventajas y desventajas.....	31
1.3.2 Principales aplicaciones.....	34
1.3.3 Fenómenos presentes en la generación.....	35
1.3.4 Importancia de la calidad de vapor para equipos generadores.....	36
1.3.5 Evaporador.....	37
1.3.6 Tipos de evaporadores a baja presión.....	38
1.3.7 Caldera de vapor.....	40
1.3.8 Tipos de calderas de vapor.....	42
1.4.1 Energía solar concentrada (colector solar).....	47
1.4.2 Relación de concentración geométrica y colectores estacionarios.....	48
1.4.3 Colectores con concentración.....	49
1.4.4 Colector solar con seguimiento en uno y dos ejes.....	52
1.4.5 Principales tecnologías de concentración solar para la generación de vapor.....	52
1.5 Proceso de la generación directa de vapor (DSG).....	63

1.5.1 Ventajas y desventajas de la generación directa de vapor .....	64
1.5.2 Modos de operación .....	66
1.5.3 Importancia de la eficiencia óptica para la DSG .....	68
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	73
2.1 Planteamiento materiales y método .....	73
2.1.1 Diseño y construcción .....	74
2.1.3 Espejos Miro - SUN .....	84
2.1.4 Tubo evacuado (absorbedor) .....	87
2.2 Diseño óptico del colector de canal parabólico .....	88
2.2.1 Relación de concentración .....	90
2.2.2 Eficiencia óptica .....	92
CAPÍTULO 3. ANALÍISIS Y RESULTADOS.....	93
CONCLUSIONES .....	115
REFERENCIAS .....	116
APENDICE A.....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologías contempladas con energía solar.....	14
Figura 2. Mapa de la radiación solar en México.....	17
Figura 3. Promedio anual de la irradiación global.....	18
Figura 4. Presión-temperatura del agua y vapor.....	30
Figura 6. Evaporador de tubos.....	39
Figura 7. Evaporador de película.....	40
Figura 8. Funcionamiento de una caldera.....	41
Figura 9. Caldera pirotubular de vapor.....	43
Figura 10. Caldera pirotubular horizontal.....	44
Figura 11. Caldera vertical de vapor.....	44
Figura 12. Caldera acuotubular de vapor.....	45
Figura 13. Configuraciones de concentración.....	50
Figura 14. Concentración lineal y puntual.....	53
Figura 15. Energías de concentración solar con o sin almacenamiento de energía térmica.....	55
Figura 16. Colector de plato parabólico.....	56
Figura 17. Torre solar.....	57
Figura 18. Colector de canal parabólico.....	59
Figura 19. Sistema de concentración parabólica.....	60
Figura 20. Receptor de un colector de canal parabólico.....	61
Figura 21. Colector fresnel.....	63
Figura 22. Principales tareas y resultados de los principales proyectos de generación directa de vapor.....	65
Figura 23 comparación de un diseño de planta solar para tecnología de petróleo (izquierda) y DSG (derecha).....	68
Figura 24. Concentrador parabólico.....	75
Figura 25. Recirculación del concentrador parabólico.....	76
Figura 26. Perfiles del concentrador parabólico.....	77
Figura 27. Arreglo doble tubo parabólico.....	82
Figura 28. Diagrama instrumentación y tuberías.....	83
Figura 29. Lámina miro-sun.....	87
Figura 30. Principios geométricos de la parábola.....	90
Figura 31. Grafica de irradiación vs tiempo a lo largo de la prueba.....	103
Figura 32 grafica de eficiencia 3.86% con 1 perfil.....	108
Figura 33 grafica de eficiencia 9.6% con 1 perfil.....	108

Figura 34 grafica de eficiencia 8.66% con 2 perfiles. ....	111
Figura 35 grafica de eficiencia 19.24 % con 2 perfiles. ....	111
Figura 36 grafica de eficiencia 11.7 % con 3 perfiles. ....	113
Figura 37 grafica de eficiencia 12.68 % con 3 perfiles. ....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Incidencia de energía solar en las regiones del país. ....	18
Tabla 2. Índices de dureza.....	23
Tabla 3 Impurezas comunes en el agua para generación de vapor. ....	28
Tabla 4. Ventajas y desventajas del vapor sobrecalentado a baja presión. ....	32
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los colectores estacionarios. ....	48
Tabla 6. Ventajas y desventajas de un colector con concentración. ....	50
Tabla 7. Descripción y especificación de la tecnología de canal parabólico.....	54
Tabla 8. Descripción y especificación de la tecnología de colector fresnel.....	54
Tabla 9. Descripción y especificación de la tecnología de torre solar.....	54
Tabla 10. Descripción y especificación de la tecnología de colectores de plato parabólico.....	55
Tabla 11. Condiciones de sal fundida y agua / vapor para la generación de vapor. ....	67
Tabla 12. Ventajas y desventajas de la generación directa de vapor. ....	69
Tabla 13. Acero inoxidable 304 especificación a diferentes temperaturas. ....	78
Tabla 14. Especificación del bloque 1.....	79
Tabla 15. Especificaciones del bloque 2. ....	79
Tabla 16. Especificaciones del 3 bloque. ....	81
Tabla 17. Reflectancia de los materiales más usados para concentradores de energía. .	85
Tabla 18. Propiedades de distintos materiales para superficies reflectoras. ....	85
Tabla 19. Características del tubo comercial absorbedor.....	88
Tabla 20. Características de los concentradores solares según el flujo energético que pueden producir.....	89
Tabla 21. Medidas de lámina miro sun. ....	89
Tabla 22. Relaciones de concentración.....	91
Tabla 23. Resultados número adimensional con 1 perfil.....	93
Tabla 24. Resultados número adimensional con 2 perfil.....	95
Tabla 25. Resultados número adimensional con 3 perfil.....	97
Tabla 26. Cinética térmica prueba experimental. ....	100
Tabla 27. Resultados de eficiencias con 1 perfil. ....	106
Tabla 28. Resultados de eficiencias con 2 perfiles.....	109
Tabla 29. Resultados de eficiencias con 3 perfiles.....	112

## RESUMEN

El objetivo del trabajo fue diseñar un concentrador parabólico desmontable de energía solar de bajo costo, para la generación directa de vapor (GDV). Los materiales que se utilizaron fueron accesibles y el diseño se basó en los principios de una parábola para poder concentrar la irradiación solar en el foco y calentar agua. La construcción del concentrador se realizó con una base de madera cortada por láser y para la parte óptica, utilizamos espejos de aluminio de una marca comercial que son resistentes a la intemperie. La diferencia a otros concentradores parabólicos fue el arreglo en el equipo, se hizo una recirculación para poder aprovechar mejor la transferencia de calor y tener menores pérdidas de energía con el ambiente.

Las pruebas experimentales se realizaron en horas y días calurosos, donde pudimos captar una mejor irradiación solar, con la ayuda de un sensor proporcionado por el programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario (PEMBU), realizamos pruebas experimentales conociendo los valores de irradiación en cada etapa de nuestras experimentaciones. Los experimentos llevados a cabo fueron con 1, 2 y 3 espejos, para poder analizar la eficiencia del equipo con las 3 relaciones de concentración con las que trabajamos, dependiendo con cuantos espejos obteníamos la generación directa de vapor. Las réplicas fueron con diferentes caudales de entrada y temperaturas para analizar la mejor combinación para la generación directa de vapor.

## INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Química se encarga de la concepción, diseño, optimización puesta a punto, operación, control y gestión rentable, segura y sostenible de procesos fisicoquímicos de adecuación, separación, transferencia y transformación de la materia y energía, desde una escala de laboratorio a la escala industrial (Bueno de las Heras, 2015).

Hoy en día la búsqueda de energías renovables y limpias, generan un punto de atención para el cuidado del medio ambiente; aprovechar una fuente de energía natural es de gran importancia, ya que la demanda va en aumento. Las emisiones de gases en la atmosfera siguen siendo el tema principal en la comunidad internacional, porque es uno de los principales focos de contaminación a nivel mundial considerando que la mayor parte de energía térmica en el mundo está basada en uso de hidrocarburos provenientes del petróleo y gas natural, cuyas reservas permiten satisfacer la demanda para algunos años.

En la actualidad se han llegado a generar acuerdos internacionales donde el desarrollo de la tecnología para aprovechar la radiación solar se reconoce como una solución apropiada para la generación de energía térmica y eléctrica. Considerando a la radiación solar como la fuente primordial de las tecnologías renovables la energía fotovoltaica y solar podría generar el 27% de la electricidad global, demandada para 2050 (Pérez y Prieto, 2015).

La radiación solar es el recurso energético más abundante disponible en el planeta y la energía que llega a la superficie de la tierra cada hora es de 430 quintillones de julios, la demanda global anual de energía estimada por el ser humano es de 410 quintillones se julios. Sin embargo, la radiación solar es un recurso de densidad relativamente baja, y su recolección con alta eficiencia no es una tarea sencilla, se debe principalmente al costo de inversión para desarrollar estas tecnologías, además los sistemas no han tenido gran aceptación debido a la intermitencia y requerimientos para el diseño de almacenamiento de energía.

Sin embargo, para el aprovechamiento de la energía solar se tiene como primera limitante su baja densidad de potencia comparada con los combustibles fósiles, por lo que se busca sistemas con elevada eficiencia de conversión. Otra limitante es su intermitencia, ya sea por el ciclo día-noche o bien por condiciones atmosféricas adversas como lluvia o nublados (Escoda, 2018).

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Clasificación de las energías renovables y tecnología solar en México

Desde la perspectiva humana, la energía es entonces, ubicua y permanente. Ubicua, porque el ser humano en tanto ente biológico y social depende de ella, ya sea como la radiación solar indispensable para las funciones biológicas o como la fuerza motriz del agua o del viento requerida para impulsar los antiguos molinos, o los modernos equipos de generación eléctrica, los tipos de energías renovables son:

- Energía eólica: Producida por el viento.
- Energía geotérmica: Producida por el calor de la tierra.
- Energía hidráulica: Producida por las corrientes de agua dulce.
- Energía mareomotriz: Producida por los mares y océanos.
- Energía solar: Producida por el sol.

Las energías suelen clasificarse en convencionales y no convencionales, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y la penetración en los mercados energéticos (Almanza, 2008).

Convencionales:

- Hidráulica.
- Geotérmica.
- Petróleo, gas natural y carbón.

No convencionales:

- Eólica

- Solar
- Oceánica
- Biomasa

Las energías renovables, no convencionales al ser autóctonas y dependientes de su forma de aprovechamiento, tienen como función generar menores impactos ambientales en comparación con las energías renovables convencionales. Además de la magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica (Estrada *et. al*, 2005):

- Potencial explotable de los recursos renovables.
- Localización geográfica.
- Mercados energéticos.

Si bien los tipos de energías renovables más desarrollados en México son la hidráulica y geotérmica, la energía solar comienza a tener mayor interés en su desarrollo, ya que la radiación electromagnética proveniente del sol es la principal fuente de energía y de mayor abundancia que tiene la tierra, además es totalmente limpia, pero su dispersión y discontinuidad dificultan notablemente su aprovechamiento en el ámbito industrial

Transitar a estas tecnologías, nos permite, prevenir y mitigar los efectos del cambio climático, además el país forma parte del cinturón solar, que refiere a los 60 países que reciben mayor cantidad de radiación solar en el planeta, por lo que el potencial para transitar a fuentes de energía naturales es muy grande y de gran provecho para el país (Almanza, 2008).

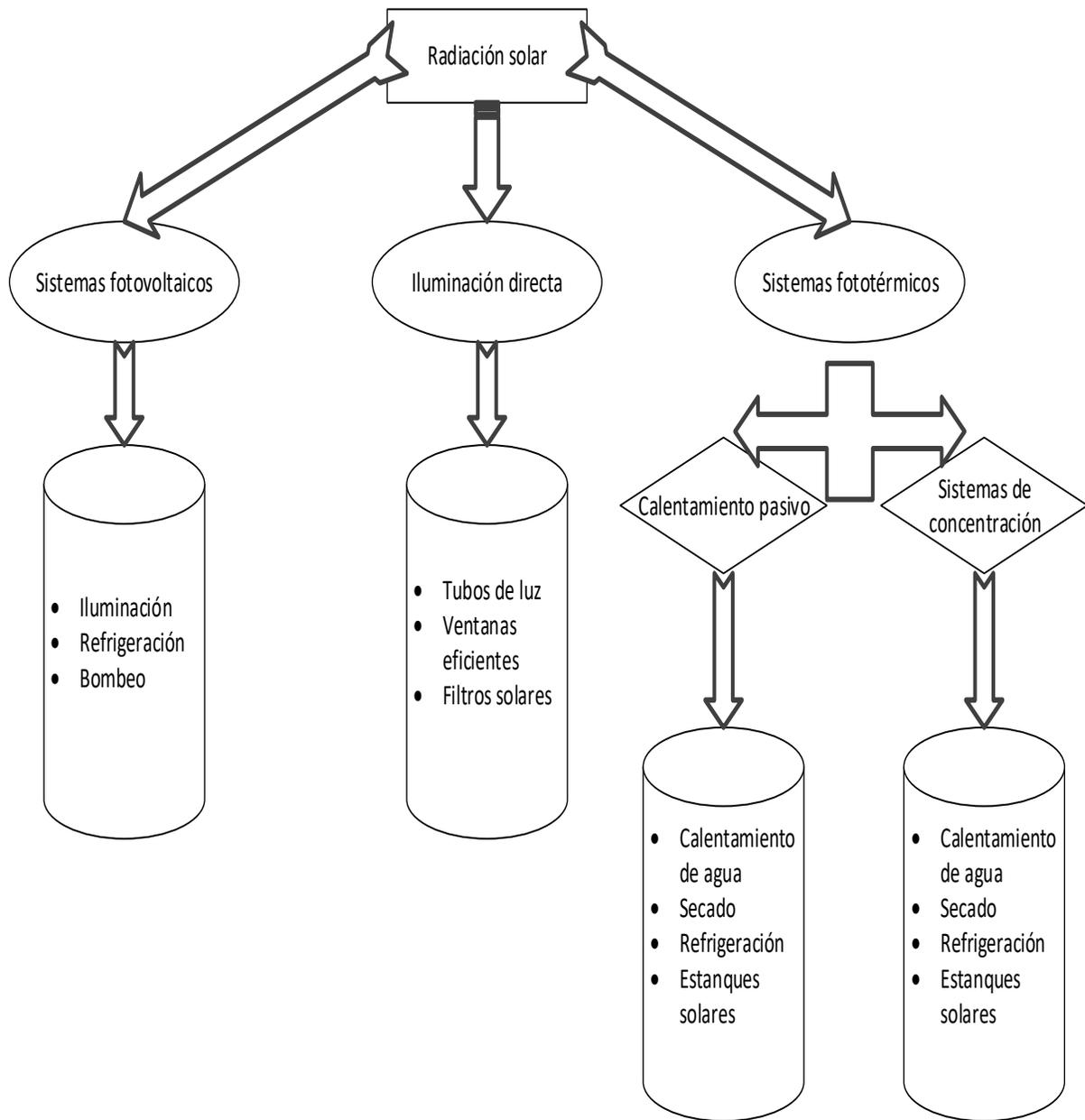


Figura 1. Tecnologías contempladas con energía solar.

Nota: Tecnologías desarrolladas para transformar la energía solar, en energías limpias y amigables con el medio ambiente, dependen de ciertos factores (Almanza, 2008):

- Disponibilidad de la radiación solar.
- Caracterizar los aspectos de la radiación solar en la región adecuada.

- Datos confiables de radiación directa normal y radiación global (dimensión de sistemas de energía solar).
- Tener en cuenta parámetros meteorológicos como: temperatura ambiente, temperatura de bulbo húmedo y velocidad del viento, los cuales pueden afectar el comportamiento de los equipos.

México no cuenta con un plan de objetivos específicos de energía solar en el programa de desarrollo eléctrico nacional, a pesar de firmar compromisos internacionales para la generación limpia de electricidad en 2016. Desde 2013, México continúa con el aumento en la proporción de combustibles fósiles en su matriz eléctrica (Agencia Internacional de Energía [IRENA], 2016 p.10).

El panorama energético de México tiene gran importancia para generar conciencia en el uso de energías renovables y poder generar menor contaminación. El crecimiento en el consumo de energía primaria (petróleo, gas natural y carbón) ha generado una gran inquietud, ya que hay varios sectores en las actividades humanas que tienen un consumo excesivo, como el transporte y la generación de electricidad.

México es el noveno gran emisor de dióxido de carbono en el mundo, con una participación de 1.5 % de las emisiones de gases de invernadero. Actualmente, América del Norte produce más del 25 % de este gas arrojado a la atmósfera en todo el mundo por quemar combustibles fósiles y por otras actividades (Estrada, 2005).

El Programa de ciencia del cambio climático en Estados Unidos realizó un estudio, en el cual América del Norte arrojó al aire mil 856 millones de toneladas métricas de carbono en 2003, de los cuales el 85 % corresponde a Estados Unidos, 9 % a Canadá y 6 % a México (King *et. al*, 2007).

La manera de medir el potencial de energía solar que tiene un territorio es a través de la radiación solar. Según la agencia internacional de energía renovable (IRENA), México se encuentra entre los 15 y 35 grados de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares. En la figura 2, se observa que el norte del país es la zona con mayor potencial. Sin embargo, los puntos de demanda más altos son el centro del país, también las zonas áridas de Puebla, Oaxaca y buena parte de Morelos son excelentes para su explotación a lo largo del año, lo que implica un reto de infraestructura de transmisión de electricidad para comisión federal de electricidad (IRENA, 2016, p.12)

La planta solar más importantes en el territorio, es la planta villa nueva, ubicada en la región de la comarca lagunera, al sur de Coahuila, en donde se encuentran instalados 2.300.000 paneles solares en una gran zona desértica, eso lo convierte en la actualidad en el proyecto fotovoltaico más grande de américa. También destaca la instalación de la planta villa ahumada en chihuahua que cuenta con una capacidad de 150 MW (ASOLMEX, 2021, p.5).

La energía solar produce también otros beneficios, como la posibilidad de mayor control local sobre los recursos energéticos y, con ello, alcanzar mayores niveles de seguridad, sobre todo si se considera la alta vulnerabilidad a eventuales operaciones de sabotaje en las plantas nucleares o en la infraestructura de petróleo y gas, lo cual ya está sucediendo en México (Estrada, 2005).

Dentro de la generación eléctrica nacional no hay una diversificación mayor en la canasta energética, ya las tecnologías de fuentes renovables apenas comienzan a ser una opción para el desarrollo energético del país. Es por esta razón que el impulso de la energía solar es importante en el país que ayudaría a reducir la dependía a fuentes fósiles (ASOLMEX, 2021, p.5).

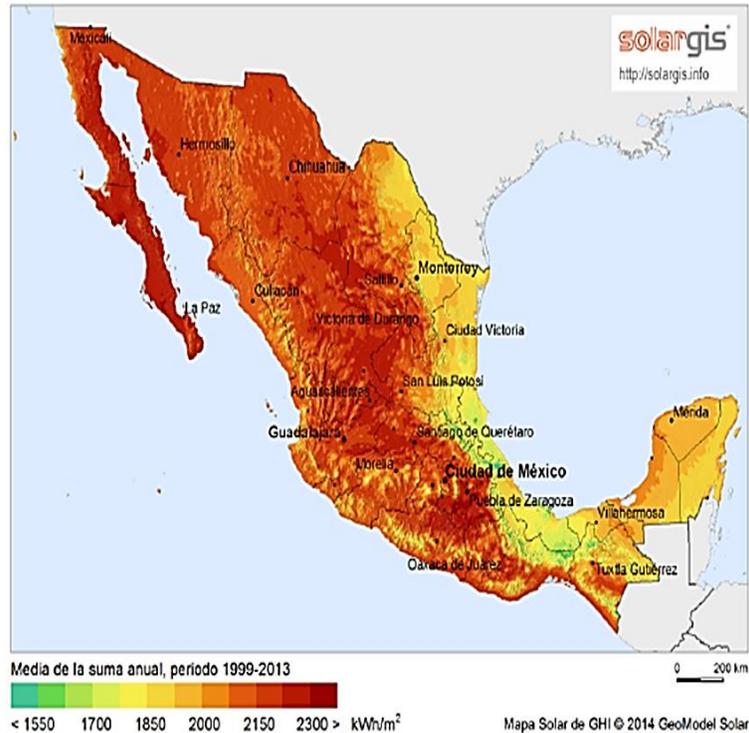


Figura 2. Mapa de la radiación solar en México (IRENA, 2016, p.12).

### 1.1.1 Irradiación solar

El sol es capaz de hacer llegar a la tierra  $1367 \frac{W}{m^2}$  en forma de radiación electromagnética (este valor se le conoce como constante solar). En el país valor oscila desde  $21.3 \frac{MJ}{m^2}$  a  $14.9 \frac{MJ}{m^2}$ . Para nuestro país, la energía solar representa una fuente importante de energía a considerar para el presente y futuro.

La figura 3, no muestra las zonas de la república mexicana más altas de irradiación en el territorio, de manera que su completo desarrollo tecnológico sería de forma eficiente a lo largo del año. En la tabla 1, podemos visualizar la cantidad de irradiación que llega a cada zona del país (Almanza, R. 2008).



Las regiones de mayor irradiación en la república mexicana son sonora, chihuahua y el oriente de baja california. Las regiones mencionadas son las más propicias para ubicar instalaciones que requieran de una alta incidencia de energía solar.

Existen otras dos regiones bastante definidas con más de  $19.2 \frac{MJ}{m^2}$  en el año: una abarca Durango, Zacatecas, Aguascalientes, y otra, la mayor parte de Puebla, Guerrero y Oaxaca. Asimismo, se aprecia que más de la mitad del país recibe  $17 \frac{MJ}{m^2}$  diarios en el año, lo cual significa que en México el uso de la energía solar representa una fuente importante de energéticos para el presente y para el futuro.

El provenir de la evaluación de irradiancia e irradiación, se centra en el uso de satélites para obtener imágenes en tiempo real, principalmente se utiliza para la evaluación de los dispositivos y poder comparar eficiencias, para las diferentes aplicaciones de la energía solar (Estrada y Almanza, 2005).

### **1.1.2 Irradiación directa y difusa diaria mensual en una superficie horizontal**

Los valores de irradiación mensual son mayores en los meses de junio a octubre, es posible apreciar una cierta tendencia latitudinal en la densidad de flujo de la radiación solar directa, con valores de  $10 \frac{MJ}{m^2}$  en la región centro-sur del país, que se incrementan hacia el norte con valores de hasta  $28 \frac{MJ}{m^2}$  (Estrada y Almanza, 2005).

A partir de octubre esta tendencia parece revertirse y se puede apreciar una variación de oeste a este durante noviembre a mayo, con mayores irradiaciones en la región central del país, con valores de hasta  $22 \frac{MJ}{m^2}$  en algunas zonas, mientras que en ambas regiones costeras los valores no son más altos de  $14 \frac{MJ}{m^2}$  y siempre con mínimos en la costa oriental de hasta  $6 \frac{MJ}{m^2}$ .

Prácticamente durante todo el año, se puede apreciar poca variación en los valores de radiación difusa en la región sursureste del país, con mínimo de  $6 \frac{MJ}{m^2}$  y máximo de  $8 \frac{MJ}{m^2}$ .

En cambio, en la región noroeste del país aparecen valores mínimos de hasta  $3 \frac{MJ}{m^2}$  y éstos se van incrementando hacia el noreste-este, donde aparecen máximos de hasta  $9 \frac{MJ}{m^2}$  en la parte norte del estado de Tamaulipas (Estrada y Almanza, 2005).

## 1.2 Calidad del agua para la generación de vapor

El agua de una calidad dada para una serie de condiciones puede ser totalmente inadecuada para otros fines. La purificación de agua que resulta satisfactoria para usos municipales es frecuentemente inadecuada para muchos procesos industriales (Ayanegui, 1992).

Todas las industrias que dependen de suministros públicos de agua deben, esperar que el agua cruda que es suministrada tenga los intervalos de especificaciones propios. El tratamiento completo de purificación para diferentes usos en específico corresponde a la iniciativa privada.

El tratamiento de agua para la generación de vapor tiene como objetivo proteger a los equipos contra la corrosión e incrustaciones, el descuido en el tratamiento de agua para los equipos origina altos costos de mantenimiento, así como el desgaste prematuro de los equipos. Por tal motivo en el uso de agua para generar vapor se necesita eliminar la dureza y tener las siguientes características (Powell, 1976):

- Cero durezas.
  - PH en un rango de 10.5 – 11.5.
  - Libre de oxígeno disuelto con un valor de sulfito residual menor a 50 ppm.
- Solidos totales disueltos.

- Libre de sólidos suspendidos.

### 1.2.1 Tipos, propiedades físicas y dureza

A lo largo de la historia, la calidad del agua ha sido un factor determinante del bienestar humano. Las enfermedades propagadas por agua contaminada con materia fecal diezmaron a la población de ciudades enteras, incluso en la actualidad, el agua insalubre contaminada por fuentes naturales o humanas, siguen causando grandes problemas a la población que se ven obligadas a usarla para sus actividades cotidianas. Las aguas pueden clasificarse como “duras” o “blandas”, ácidas o alcalinas, para describir sus características predominantes reflejadas por los compuestos que contienen (Powell *et. al*, 1992).

El agua tiene varias propiedades importantes que son cruciales en su papel como disolvente, como medio de vida en el comportamiento ambiental y en usos industriales basadas en las siguientes características de su molécula (Mahan, 2007):

- La asimetría de su molécula.
- Su naturaleza polar.
- La capacidad de formar enlaces o puentes de hidrógeno.

El agua es un disolvente excelente para varias sustancias, incluyendo las sales, ácidos, bases y sustancias que tienen átomos de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno capaces de formar enlaces de hidrogeno (Mahan, 2007).

Posiblemente la propiedad física más importante del agua es su comportamiento con el calor. El agua líquida tiene una capacidad calorífica de 4.184 Joules por gramo de un grado centígrado, lo que significa que se requieren 4.184 Joules de energía calorífica para elevar la temperatura de 1 un gramo de agua líquida a un 1 grado centígrado.

Gracias a esta gran capacidad calorífica estabiliza las temperaturas de las regiones cercanas a los reservorios de agua (Mahan, 2007).

Su elevada capacidad calorífica del agua se debe al hecho de que las moléculas de agua están fuertemente ligadas por enlaces o puentes de hidrógeno. Se necesita una gran cantidad de energía, para romper estos enlaces y permitir a las moléculas de agua moverse más rápidamente a temperaturas más altas.

El calor de fusión del agua también es alto, de 334 Joules por gramo. Significa que se requiere una cantidad muy grande de calor para separar las moléculas de agua, mantenidas en posiciones fijas por los enlaces de hidrógeno en el hielo, para convertir el agua a estado líquido. Cuando el hielo se funde, mientras estén presentes tanto el hielo sólido como el agua líquida, la temperatura permanece constante a la temperatura de fusión (Mahan, 2007).

Sin embargo, el calor latente contenido del agua se libera cuando el vapor se condensa, que es lo que sucede durante la lluvia, esta descarga de calor calienta la masa de aire, haciéndolas elevarse y es la fuerza impulsora tras las tormentas y los huracanes. El calor latente en forma de vapor de agua que se evapora de los océanos cerca del ecuador es conducido lejos de este incorporado en masas de aire y liberado cuando el vapor de agua se condensa para formar la lluvia.

La dureza del agua obedece principalmente a las sales de calcio y magnesio disueltas en ella, la dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes, iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos y bicarbonatos, y se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua (Ayanegui, 1992).

Esta cantidad de sales afecta la capacidad de formación de espuma de detergentes en contacto con agua y presenta una serie de problemas de incrustación en equipo industrial y doméstico, además de resultar nociva para consumo humano (Ayanegui, 1992).

De acuerdo con la concentración de carbonatos contenidos en el agua, esta se puede clasificar en niveles de dureza.

Tabla 2. Índices de dureza.

<b>Denominación</b>	<b><math>CaCO_3 \frac{mg}{L}</math></b>
<b>Muy suaves</b>	0-15
<b>Suaves</b>	16-75
<b>Medias</b>	76-150
<b>Duras</b>	150-300
<b>Muy duras</b>	Mayor a 300

(Ayanegui, 1992).

### 1.2.2 Principales fuentes de abastecimiento para equipos generadores de vapor

Las fuentes de abastecimiento para los equipos generadores de vapor son:

- Agua municipal.
- Agua subterránea.

El agua subterránea es el recurso hídrico más importante del mundo, ya que es la principal fuente de abastecimiento. Se puede decir que esta agua requiere menos tratamiento para su uso puesto que no acarrea sedimentos suspendidos y es mejor calidad, a comparación del agua superficial (CONAGUA, 2015).

Los principales métodos de tratamiento son carbón activo, coagulación-precipitación, osmosis inversa, ozonificación y tratamiento biológico aeróbico.

- Tratamiento de agua con ozono

Tiene una gran ventaja, el ozono cuenta con un gran poder oxidante debido a esto el resultado de desinfección es superior al que se emplea con cloro y así se eliminan microorganismos, bacterias y virus resistentes al cloro.

- Tratamiento de agua con carbón activado

Elimina los contaminantes que generan los olores, también remueven sustancias orgánicas e inorgánicas del agua, incluyendo metales pesados.

El agua municipal se divide en áreas dos principales:

- Agua potable.
- Aguas residuales.

Los tratamientos de agua municipales requieren de varios pasos, según sea el proceso final agua potable o residual.

Tratamiento de agua municipal potable:

- Tratamiento primario de agua de origen con mallas, membranas de ultrafiltración.
- Después de los tratamientos primarios, es posible un tratamiento adicional mediante osmosis inversa o reversión de electrodiálisis.
- El paso final es la desinfección, el cual se vale de tecnologías de ozono u ultravioleta para proteger a las comunidades de los contaminantes.

Tratamiento de agua municipal residual:

- Eliminación de sólidos con filtros y removedores de arenilla.
- Eliminación de compuestos orgánicos y nutrientes.
- Para producir efluentes de alta calidad, valiéndose de membranas de ultrafiltración de alta eficiencia.
- La desinfección/oxidación elimina los patógenos en el agua mediante el uso de desinfección ultravioleta o con ozono.

Los métodos de filtración para tratar el agua municipal de manera efectiva pueden variar, desde la filtración de partículas hasta la filtración de membrana y el tratamiento biológico. El tratamiento de agua municipal puede incorporar, tanto equipos como productos químicos. Todo depende del uso y la fuente para seleccionar el adecuado tipo y grado de tratamiento (CONAGUA, 2015).

Uso doméstico: debe desinfectarse completamente para eliminar los microorganismos patógenos y partículas indeseables como heces fecales entre otras, que causan enfermedades, pero puede llegar a contener porcentajes altos de magnesio y calcio (Ayanegui, 1992).

Uso industrial: puede contener bacterias, pero debe ser muy blanda para prevenir la formación de incrustaciones. El agua residual que se descarga en un río puede requerir un tratamiento menos riguroso que el agua que va a ser utilizada en una región árida (Ayanegui, 1992).

### **1.2.3 Acondicionamiento agua para uso en equipos generadores de vapor**

El agua se usa ampliamente en varias aplicaciones de los procesos en la industria. Sus principales aplicaciones industriales están en el agua de alimentación de las calderas. La mayoría de los equipos para generar vapor. El tipo y grado de tratamiento del agua en estas aplicaciones dependen del uso final.

Ejemplo: el agua de enfriamiento puede requerir solo un tratamiento mínimo; la eliminación de sustancias corrosivas y solutos formadores de incrustaciones es esencial para el agua de alimentación de las calderas y el agua que se emplea en el procesado o procesamiento de alimentos debe estar libre de patógenos y sustancias tóxicas (Powell et. al, 1992).

El correcto tratamiento del agua a un costo mínimo para uso industrial es un área de gran importancia para la industria, ya que los principales efectos negativos de un inadecuado tratamiento son:

- Disminución de la productividad de los equipos.
- Fallos en su funcionamiento.
- Incremento de los costos energéticos (debido al ineficaz aprovechamiento del calor o enfriamiento).
- Formación de incrustaciones.
- Contaminación del producto.

Para el diseño y buena operación de las instalaciones para el tratamiento de agua deben tener en cuenta numerosos factores:

- Cercanía del punto de suministro de agua.
- Cantidad y calidad de las fuentes de agua disponibles.
- El uso secuencial del agua (los usos sucesivos para aplicaciones que requieren progresivamente más baja calidad del agua).
- El reciclaje adecuado del agua.
- Las normas de descarga.

Tales sustancias incluyen los sólidos suspendidos o disueltos, la dureza y los gases disueltos. Después de este tratamiento básico, el agua puede dividirse en corrientes diferentes, algunas para usarse sin tratamiento posterior y el resto para ser tratada para aplicaciones específicas (Powell, 1976).

El tratamiento interno, se diseña para modificar las propiedades del agua para aplicaciones específicas:

- La reacción del oxígeno disuelto con hidracina o sulfito de sodio y calcio.
- La adición de agentes quelantes para reaccionar con el  $Ca^{2+}$  disuelto y prevenir la formación de depósitos de calcio.
- La adición de agentes precipitantes, como sales de hierro, cloruro o sulfato férricos usados para la eliminación de calcio.
- El tratamiento con dispersantes para inhibir las incrustaciones.
- adición de inhibidores para prevenir la corrosión.
- El ajuste de PH.

Un aspecto importante del tratamiento de agua para procesos industriales es el uso de anti- incrustantes y dispersantes. Los primeros previenen, la formación de incrustaciones a partir de materiales como  $\text{CaCO}_3$  y los dispersantes impiden la adhesión a las superficies de las partículas que causan las incrustaciones, manteniéndolas dispersas en el agua (Powell et. al,1992).

Tabla 3 Impurezas comunes en el agua para generación de vapor.

Constituyente	Formula química	Fuente principal del contaminante	Efecto principal de los contaminante	Tratamientos típicos para removerlo del agua
<b>Sólidos en suspensión</b>		Drenaje superficial y residuos industriales	Arrastres, espumas, lodos o incrustaciones	Sedimentación libre, coagulación, filtración, evaporación. Intercambio iónico.
<b>Sílice</b>	$\text{SiO}_2$	Depósitos minerales.	Incrustación.	
<b>Carbonato de calcio</b>	$\text{CaCO}_3$	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.

Continuación. Tabla 3 impurezas comunes en el agua para generación de vapor.

Bicarbonato de calcio	$Ca(HCO_3)_2$ $Ca(HCO_3)_2$	Depósitos minerales.	Incrustación, corrosión	iónico, evaporadores.
Sulfato de calcio	$CaSO_4$			Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Cloruro de calcio	$CaCl_2$			
Carbonato de magnesio	$MgCO_3$			
Bicarbonato de magnesio	$Mg(HCO_3)_2$			
Cloruro de magnesio	$MgCl_2$			
Ácidos libres	$HCl, H_2SO_4$	Drenajes de mina, residuos industriales.	Corrosión	Neutralización, seguida en ocasiones de ablandamiento o evaporación.
Cloruro de sodio	$NaCl$	Aguas negras, residuos industriales, depósitos minerales.	Inerte, pero puede generar corrosión bajo ciertas condiciones	Evaporación y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Carbonato de sodio	$NaCO_3$	Depósitos minerales,	Arrastres, espuma, fragilización	
Bicarbonato de sodio	$NaHCO_3$	descomposición de materia orgánica.	Arrastres, espuma, fragilización	
<b>Oxígeno</b>	$O_2$	Absorción de la atmósfera.	Corrosión.	

(Powell, 1976).

### 1.3 Vapor de baja presión y tecnologías principales para su generación

El vapor es el fluido de mayor importancia en la industria, ya que es la fuente de calor más usada a nivel industrial. La producción de vapor limpio y seco ha ocupado la atención de los ingenieros para las diferentes etapas de un proceso. Las mejoras en el diseño de calderas hasta el momento satisfacen la demanda económica en generación de vapor, pero en muchos casos son un obstáculo para la calidad del vapor (Ayanegui, 1992).

Si calentamos el agua a una temperatura mayor, que la temperatura de ebullición, se convierte en vapor. Sin embargo, no todo el vapor es el mismo, sus propiedades son dependientes de la presión y temperatura, a la cual está sometido como se observa en la figura 4 (Mahan, 2007).

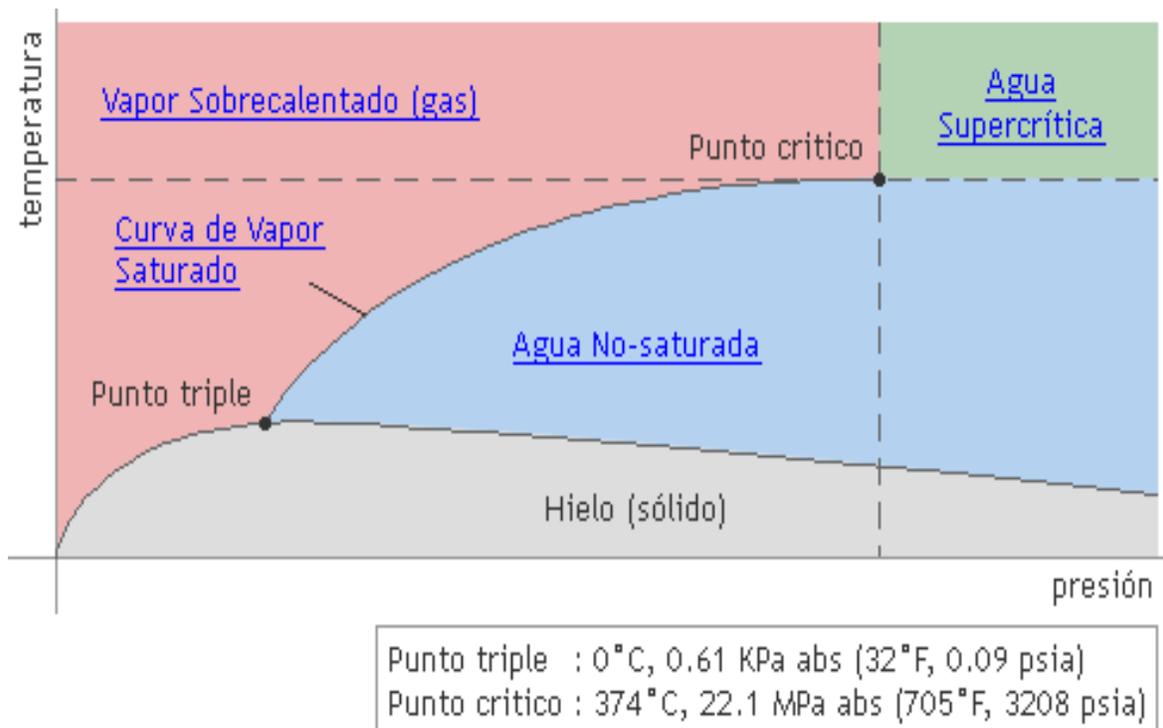


Figura 4. Presión-temperatura del agua y vapor (Ayanegui, 1992).

- Vapor saturado:
- Se presenta a presiones y temperaturas donde el gas (vapor) y el líquido (agua), pueden coexistir juntos. Significa que el rango de vaporización del agua es igual al rango de condensación. El vapor saturado cuenta con varias propiedades que lo hacen una gran fuente de calor, a temperaturas de cien grados centígrados y más elevadas.
- Vapor húmedo:
- Al momento que en el agua se aproxima a un estado de saturación y comienza a evaporarse, se mantiene una porción de agua en forma de gotas. Es la forma de vapor más común, ya que cuando se genera el vapor contiene humedad proveniente de las partículas de agua no vaporizadas, incluso los mejores equipos de generación de vapor contienen un 3% a 5% de humedad.
- Vapor sobrecalentado:
- Se crea por el sobrecalentamiento del vapor saturado o húmedo. Alcanza un punto mayor de saturación, significa que contiene una mayor temperatura, pero menor densidad que el vapor saturado a una misma presión. El vapor sobrecalentado se utiliza principalmente en la industria para el movimiento e impulso de equipos (Mahan et. al, 2011).

### **1.3.1 Ventajas y desventajas**

Ventajas del uso de vapor:

- Es estéril, limpio, no toxico y no ensucia si hay fugas.
- Tiene excelentes propiedades para transferir calor.
- Transmite calor a una temperatura constante que es controlada por su presión.
- Es trasportado por la presión generada y es fácilmente controlable.

Sin embargo, la generación de vapor presenta algunas desventajas:

- El agua no debe contener impurezas.
- Se tiene un proceso de oxidación debido al oxígeno presente en el agua.
- La tubería en donde se genera o transporta debe tener un aislante para evitar la pérdida de calor.
- El armado de la tubería tiene que ser muy minucioso, ya que no hacerlo de la manera correcta puede generar fugas en el sistema.

En los procesos a nivel industrial el vapor es importante, no solo es por su facilidad para transferir calor, ya que también se utiliza en otras aplicaciones como: el impulso y movimiento (Sánchez y Gonzales, 2011).

Se presenta principalmente en 3 tipos:

- Vapor de baja presión: 2,960 atm y 135°C de condensación.
- Vapor de media presión: 19,7385 atm y 212°C de condensación.
- Vapor de alta presión: 39,476 atm y 250°C de condensación.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del vapor sobrecalentado a baja presión.

Propiedad	Ventajas	Desventaja
Transferencia de calor limitada	Mantener secos a los equipos impulsados por vapor y no afectar su rendimiento por la generación de condensado.	Reduce la productividad

Continuación. Tabla 4 Ventajas y desventajas del vapor sobrecalentado a baja presión.

	<b>Mejorar la eficiencia térmica y capacidad laboral.</b>	<b>Se requiere una superficie mayor para la transferencia de calor</b>
<b>Temperatura variable aun a una presión constante</b>	Lograr cambios significativos en el volumen específico del estado sobrecalentado a menores presiones.	El vapor sobrecalentado requiere mantener una velocidad elevada, de lo contrario la temperatura disminuirá ya que se perderá el calor del sistema
<b>Calor sensible utilizado para la transferencia de calor</b>	Para suministro, así como descarga de vapor, mientras este sobrecalentado y no genere condensando, minimiza el riesgo a daños por erosión.	Las caídas de temperatura pueden tener un impacto negativo en la calidad del producto
<b>La temperatura podría ser extremadamente elevada</b>		Se podrían requerir materiales más fuertes para la construcción de equipos, requiriendo un mayor costo inicial.

(Sánchez y Gonzales, 2011).

### 1.3.2 Principales aplicaciones

Vapor de baja presión (fuente de calor), el principal objetivo del vapor a baja presión es el calentamiento, fungiendo tanto como fuente directa e indirecta de calor para las diferentes etapas del proceso u obtención del producto final (Mahan *et. al*, 2011).

Calentamiento directo:

Se refiere al proceso en el cual el vapor está en contacto directo con la materia a calentar.

Aplicaciones:

- Cocinar
- Esterilización
- Vulcanización

Calentamiento indirecto:

Proceso donde el vapor no entra en contacto directo con la materia como se observa en la figura 5. Es el que más se utiliza, ya que provee un calentamiento rápido y parejo.

Generalmente utiliza un intercambiador de calor para llevar a cabo su finalidad (Mahan *et. al*, 2011).

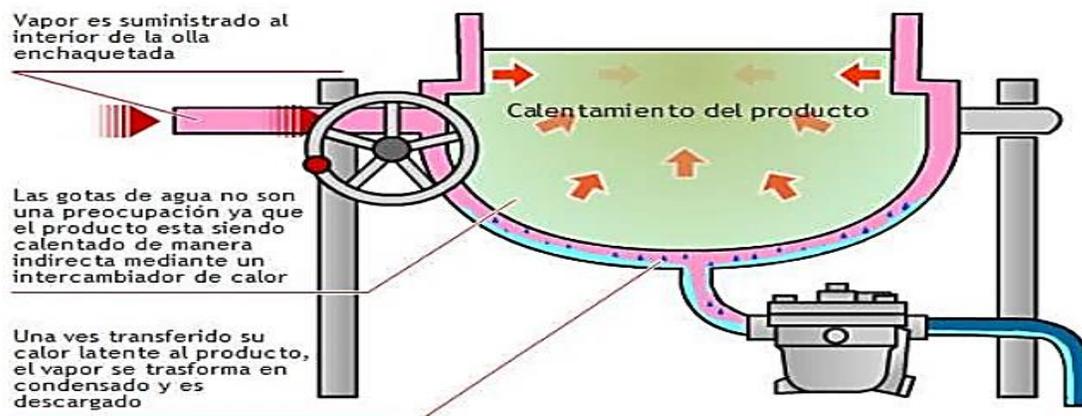


Figura 5. Calentamiento indirecto.

Nota: La figura 5, se observa que la ventaja que ofrece, las gotas de agua formadas durante el calentamiento no afectaran al producto, por lo tanto es el método más usado a nivel industrial (Mahan *et. al*, 2011).

Aplicaciones en la industria:

- Preparación de alimentos y bebidas.
- Neumáticos.
- Papel y cartón.
- Medicina.

### **1.3.3 Fenómenos presentes en la generación**

“Vómito” es el termino usualmente reservado para la proyección de líquido en la generación de vapor debido a la ebullición extremadamente rápida del agua en la superficie de calentamiento. Cuando existe este vómito, dentro de un tubo puede llenarse a tal grado con burbujas de vapor, ya que la densidad de la mezcla disminuye y eso ocasiona una expansión dentro del tubo, expulsando agua dentro del espacio del vapor hacia la salida. El fenómeno de “espuma” ocurre cuando las burbujas de vapor suben de la superficie de calentamiento, formando una capa de espuma sobre la parte superior del agua.

La rotura de burbujas, aun en ausencia de mucha espuma, dará por resultado un englobamiento relativamente pequeño y uniforme, hasta cierto grado, de humedad en el vapor.

Al considerar el fenómeno de vómito, es menos probable que ocurra y la espuma a altas presiones que a bajas, porque, aparentemente, las burbujas se producen cerca de la superficie del agua (Ayanegui, 1992).

### **1.3.4 Importancia de la calidad de vapor para equipos generadores**

El porcentaje en peso de las gotas de agua en el vapor húmedo se denomina "porcentaje de humedad". El porcentaje de calidad de vapor húmedo se obtiene restando el porcentaje de humedad de 100 %. El calor suministrado una vez que la calidad del vapor llega al 100 % se denomina calor sensible y al vapor se le denomina vapor saturado. Cabe destacar que la presión de vapor saturado posee una relación directamente proporcional con la cantidad de calor sensible necesario y una relación inversamente proporcional con la cantidad de calor latente, es decir, cuando la presión de vapor saturado aumenta, entonces la proporción de calor sensible aumenta, mientras que la proporción de calor latente decrece (Martínez, 2013).

Cuantificar la calidad de vapor, debe ser una acción recurrente, ya que de ello depende poder mantener la vida útil de los equipos y proporcionar productos finales de calidad. En términos generales se define la calidad del vapor como una medida de la cantidad de vapor saturado que coexiste con su condensado en un sistema dado.

Del mismo modo, el condensado de alta velocidad puede causar otros problemas relacionados con la erosión y la corrosión. Entonces una forma de lograr la optimización y control de costes de energía en sistemas de vapor industrial es cuantificar la calidad del vapor industrial.

Beneficios de cuantificar la calidad de vapor:

- Aumento de la eficiencia de transferencia de calor.
- Proviene las fallas prematuras en las válvulas.
- Proviene fallas en los componentes internos de las turbinas.
- Reduce el golpe de ariete.

El problema con la baja calidad del vapor es el efecto sobre la transferencia de calor en equipos y procesos. En algunos casos la baja calidad del vapor reduce las eficiencias en la transferencia de calor a no más de 65%. Además de generar problemas en válvulas de control de vapor, causando menos erosión en las partes internas, generando fallas prematuras.

Es el conjunto de sistemas formado por una caldera y sus equipos complementarios, destinados para transformar agua líquida a estado gaseoso a temperaturas y presiones diferentes al estándar (Martínez *et. al*, 2013).

Objetivos:

- Generar agua caliente por calefacción y uso general.
- Generar vapor para satisfacer necesidades puntuales en la industria.
- Accionar turbinas de equipos mecánicos.
- Suministrar calor para procesos industriales.

### **1.3.5 Evaporador**

Conocidos como equipos de destilación o evaporadores, la tendencia hacia mayores capacidades unitarias y calderas más grandes ha conducido en la adopción de evaporadores para preparar un repuesto de alta calidad para sustituir calderas. Existen muchos tipos de evaporadores y su selección depende de varios factores, estos son (Powell, 1976).

- Facilidad de operación.
- Control de la formación de incrustaciones.
- Accesibilidad para limpieza.
- Pureza del vapor.

Durante muchos años solo hubo cambios menores en el diseño de evaporadores y la calidad del vapor obtenido no era siempre satisfactorio.

Sin embargo, conforme aumento el número de instalaciones de presión, las dificultades de operación demandaron una mejoría en el diseño de los evaporadores para disminuir el arrastre producido con el objetivo de asegurar un condensado de alta calidad (Powell, 1976).

#### Principio de operación

Cámara de destilación o evaporador, donde el agua es calentada y convertida en vapor, condensador en el cual el vapor es convertido en líquido. La fuente de calor empleada para vaporizar el agua en las plantas generadoras de vapor es vapor de alta o baja presión el que a su paso por los serpentines de calentamiento se condensa cediendo su calor latente al agua cruda que va a ser evaporada. Así, en un evaporador existen fuentes de agua destilada. Como el condensado del vapor que se ha empleado en calentar el agua, la cual reemplazará al vapor usado por el evaporador y no es considerado como repuesto (Powell, 1976).

### **1.3.6 Tipos de evaporadores a baja presión**

#### Evaporador de tubos sumergidos

Consiste en un casco de hierro o acero que sirve como recipiente. El agua se calienta con vapor vivo (presión baja), que pasa a través de serpentines sumergidos.

El equipo puede ser diseñado para operar ya sea, como una unidad de tubos sumergidos o como una de tipo película como se muestra en la figura 6, (Powell, 1976).

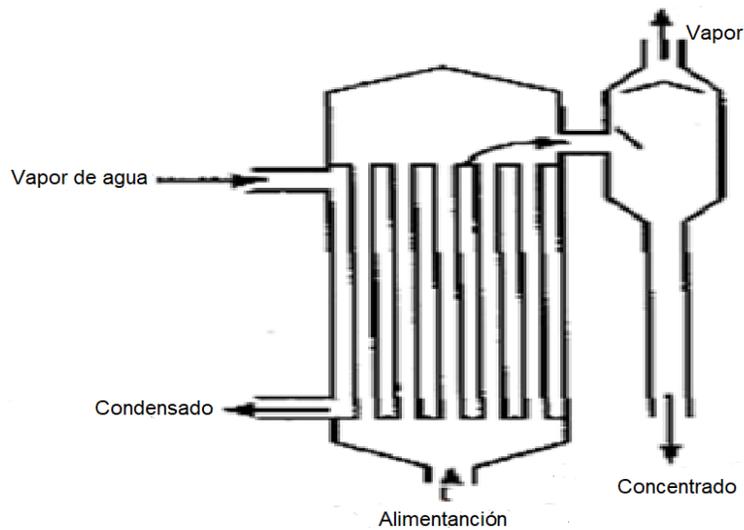


Figura 6. Evaporador de tubos (Powell, 1976).

#### Evaporador de película

Son aquellos en los que el agua cruda se hace pasar por en forma de película sobre una serie de serpentines calentados con vapor vivo como se observa en la figura 7. Los serpentines se encuentran dentro de un casco de hierro colado o acero. El agua se evapora rápidamente “flash” al pasar en forma de película sobre la superficie de los serpentines calentados con vapor, y subsecuentemente se convierte a la fase líquida en un condensador adecuado (Powell, 1976).

#### Evaporador instantáneo

Opera principalmente a baja presión, utilizando vapor de escape como fuente de calor. El evaporador consiste en un calentador tubular en el cual el agua de repuesto se calienta a una temperatura suficientemente alta, para que este se convierta en vapor rápidamente a su entrada a la cámara de evaporación.

Se debe de tener en cuenta la formación de lodos, ya que a trabajar a la baja presión se forma mayor cantidad de éstos que a alta presión, principalmente cuando se emplea agua cruda sin tratar (Powell, 1976).

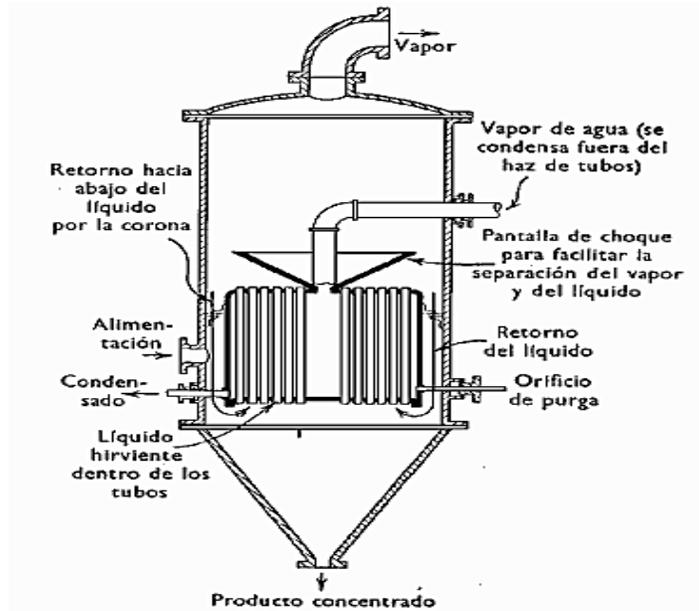


Figura 7. Evaporador de película (Powell, 1976).

### 1.3.7 Caldera de vapor

Técnicamente, puede definirse una caldera de vapor de acuerdo con la terminología actual, como un equipo a presión en donde en calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías, a través de un medio de, transporte vapor de agua. Teniendo en cuenta que la variación de la presión del vapor es el proceso que presenta un mayor significado en el funcionamiento de las calderas, ya que el control de la combustión se realiza mediante el control de la presión del vapor (Martínez, 2013).

Existen dos tipos generales de calderas:

- Pirotubulares (tubos de fuego).
- Acuotubulares (tubos de agua).

#### Funcionamiento

La caldera de vapor recibe el agua de alimentación, que está constituida en una porción variable por agua nueva, más o menos tratada llamada agua de aportación, y de agua de retorno que vuelve a partir de los condensados del vapor. En el interior del equipo el agua de alimentación se convierte en vapor, el cual está constituido en su mayoría por moléculas de agua pura. El agua se mantiene líquida en el interior de la caldera se carga de todas las sustancias y elementos que contenían el agua vaporizada, salvo las que son arrastradas en el vapor (Martínez *et. al*, 2013).



Figura 8. Funcionamiento de una caldera (Martínez, J. 2013).

En la figura 8 se muestra un diagrama básico de una caldera, la misma que está conformada por dos sistemas separados.

Sistema agua-vapor, el cual es también llamado la zona de agua de la caldera. En este sistema el agua se introduce y es calentada, por el cambio de temperatura, que es transferido a través de una barrera metálica, y que ayuda a convertirla en vapor, para finalmente salir del sistema (Dukelow, 1991).

El proceso de adición de calor para convertir agua en vapor tiene una constante de tiempo que depende de las características específicas de la instalación. Los factores que afectan esta constante de tiempo incluyen la acumulación de calor del sistema, los coeficientes de transferencia de calor en las diferentes partes del sistema, las masas del metal y de refractario y su configuración, además de otros factores adicionales (Cherres, 2011; Martínez *et al.*, 2013).

### **1.3.8 Tipos de calderas de vapor**

Alta presión: Las calderas de alta presión, por definición, son calderas de vapor que operan a presiones mayores que 19.738 atm.

La temperatura de saturación del agua en estas calderas se incrementa cuando la presión aumenta. El vapor a alta presión tiene un atributo particular que es contener una cantidad mayor de energía disponible, que es aquella que puede ser convertida en trabajo.

Baja presión: Una caldera de baja presión es aquella que opera a presiones por debajo de las 19.738 atm. Casi todas las calderas de baja presión son utilizadas para acondicionamiento de espacios (Cherres y Martínez, 2013).

Los principales problemas que aparecen con el uso de las calderas a vapor de baja presión:

- Incrustaciones
- Corrosión

- Arrastres
- Depósitos

#### Calderas de tubos de humo o pirotubulares de vapor

Las calderas pirotubulares constituyen la mayor parte de calderas industriales de pequeño o mediano tamaño. En éstas, los gases de combustión fluyen por las paredes de los tubos por convección hacia el agua que los circunda.

La transferencia de calor se genera a través de las paredes de los tubos hacia el agua para generar el vapor.

Es un cilindro compacto de agua, atravesado longitudinalmente por un haz de tubos por los que circulan la llama y/o humos. Los humos pasan por el interior de los tubos de acero, lo cuales estarán rodeados de agua. Gracias a la capacidad de volumen de agua de estos equipos, actúan como un almacén de energía proporcionando una respuesta adecuada para cualquier demanda y mayor pureza de vapor (Martínez, 2013).



Figura 9. Caldera pirotubular de vapor.

Nota: El haz tubular está dispuesto de la parte delantera a la trasera de la caldera (Martínez, J. 2013).



Figura 10. Caldera pirotubular horizontal.

Nota: El haz tubular está dispuesto de la parte inferior a la parte superior de la caldera (Martínez, J. 2013).

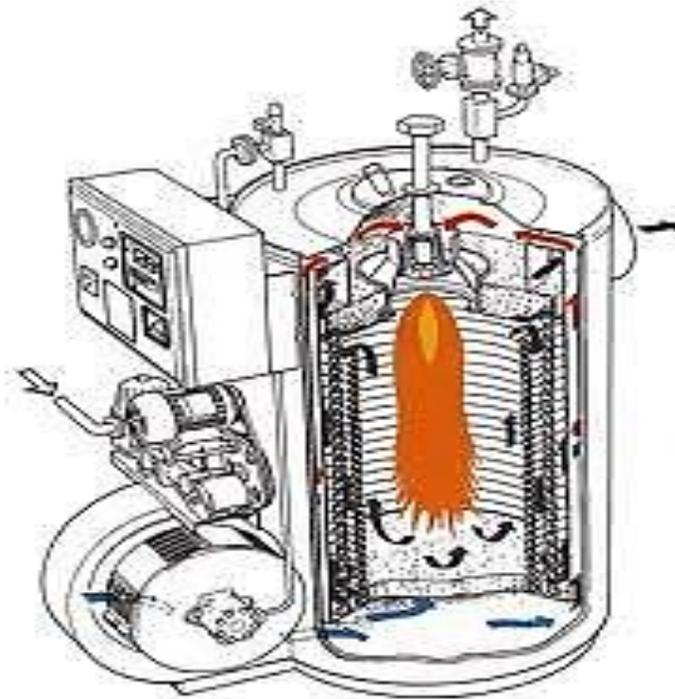


Figura 11. Caldera vertical de vapor.

Nota: La carcasa de la caldera está situada verticalmente en lugar de horizontalmente (García, 2013).

Las aplicaciones principales de las calderas pirotubulares son, cuando la presión de trabajo no rebasa las 20 atm. Por su diseño tienen un gran volumen de agua y gracias a eso, se pueden adaptar mejor a las variaciones de la instalación que las calderas acuotubulares. El vapor producido por las mismas suele tener un título de vapor cercano a 1, es decir que el contenido de agua por unidad de masa es menor al 3%, no siendo necesario instalar equipos complementarios (Martínez, 2013).

#### Calderas de tubo de agua o Acuotubulares

El agua está en gran parte contenida en haces de tubos de acero, rodeados por la llama y los gases calientes de la combustión rodean a tales haces de tubos, propiciando el calentamiento del agua, teniendo en cuenta el elevado número de tubos.

Que pueden instalarse, su instalación en régimen permanente es muy rápida, teniendo la opción de producir vapor a altas presiones como se observa en figura 12 (Cherres y Martínez, 2013).

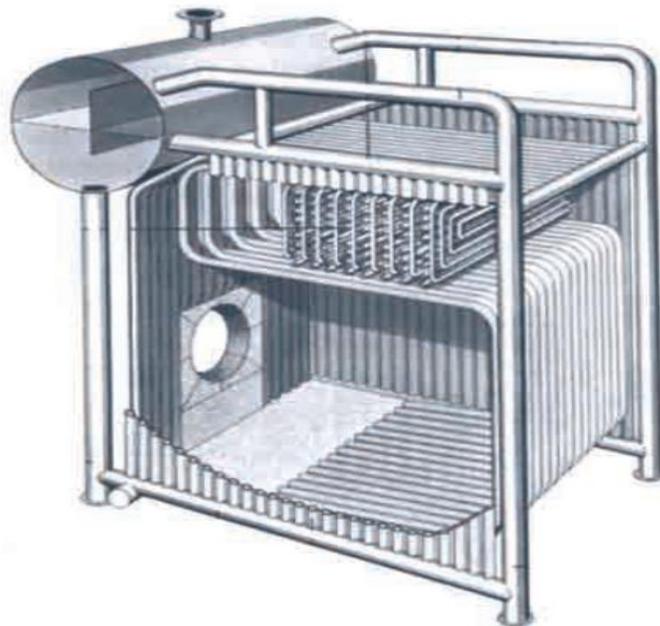


Figura 12. Caldera acuotubular de vapor (García, 2013).

## Calderas de vaporización instantánea

Son muy compactas y de poco volumen de agua, se utilizan en aplicaciones industriales o alimentarias, donde es necesario disponer de vapor a baja y mediana presión (Martínez, 2013).

### **1.4 Tecnologías de concentración solar para la generación de vapor**

La necesidad de fuentes de energía renovables limpias y accesibles es de suma importancia para satisfacer las crecientes demandas energéticas a nivel mundial. El obtener suficiente energía limpia para el futuro es un gran reto; el sol representa la mayor fuente de energía natural, proporciona a la tierra con más energía en 1 h que la que se consume en el planeta 85 billones de kw/h anualmente, es decir la radiación solar podría satisfacer 4000 veces la energía consumida por el planeta anualmente.

A pesar de esto la capacidad de aprovechamiento en las tecnologías solares para satisfacer las actividades humanas, como la generación de electricidad o vapor, actualmente proporciona una fracción mínima del porcentaje de consumo de energía en el mundo (David et. al, 2011).

Una gran cantidad de recursos para la investigación se ha investigado para la captación y almacenamiento de energía solar. Hay dos categorías principales de dispositivos utilizados para este propósito:

- Fotovoltaica: implica el uso de celdas solares para generar electricidad directamente a través del efecto fotoeléctrico
- Foto térmica: Emplea diferentes métodos de captación solar para usos en procesos térmicos, productores de energía.

Para la generación directa de vapor se requiere conocer las diferentes tecnologías de energía solar. La función principal de un generador de vapor es producir vapor a diferentes presiones (David y Ruxandra, 2015),

### 1.4.1 Energía solar concentrada (colector solar)

La energía solar concentrada se ha investigado por varias décadas, y se basa en un esquema general simple: usar espejos, la luz del sol puede ser redirigida, enfocada y recolectada como calor, que a su vez se puede utilizar para diferentes funciones como: El alimentar una turbina o motor térmico para generar electricidad, pero también para diferentes procesos industriales (Pieter et. al, 2011).

Un colector solar es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la radiación solar en energía térmica. La función básica de un colector solar es absorber la radiación solar incidente y convertirla en calor, que luego se transporta por un fluido de transferencia de calor que fluye a través del colector (agua, aceites térmicos, etc.)

El flujo de radiación incidente en México es, en el mejor de los casos, aproximadamente  $1100 \frac{W}{m^2}$  (sin concentración óptica), y es variable. El rango de longitud de onda es de 0.3 a  $3 \mu m$ , que es considerablemente más corto que el de la radiación emitida por la mayoría de las superficies que absorben energía. Así, el análisis de la energía solar a través de colectores presenta problemas únicos de flujos de energía baja y variable (Duffie y Beckman, 2013).

Hay dos categorías generales de colectores solares. El primero incluye colectores estacionarios, no concentradores, se utiliza la misma área tanto para la intercepción como para la absorción de la radiación. La segunda categoría consiste en colectores solares de concentración con seguimiento solar, que utilizan elementos ópticos para enfocar grandes cantidades de radiación en una pequeña área de recepción y seguir el sol a lo largo de su recorrido aparente en el cielo, para mantener el máximo de flujo solar en su foco. Las relaciones de concentración de luz se pueden expresar en soles, (1000 vatios por metro cuadrado) siendo una medida del flujo de luz incidente promedio por unidad de área en la superficie de la tierra (David et. al, 2011).

### 1.4.2 Relación de concentración geométrica y colectores estacionarios

La relación de concentración geométrica se refiere a la relación que existe entre el área de abertura del colector y el área de recepción, para los colectores de concentración solar, se puede tener una razón de concentración geométrica de hasta 216 y temperaturas de hasta 400°C.

Su cálculo se basa en el principio de una parábola, el modelo más utilizado para el cálculo de Razón de concentración geométrica es el elaborado por (Zaharia, 1980).

Un parámetro de diseño importante es considerar un ángulo de borde ( $\varphi$ ) de 90°. Se ha demostrado que con el ángulo de 90°, se minimiza la distancia media entre el foco y el reflector y entonces la desviación de la radiación directa, de tal forma que los errores de inclinación y seguimiento son menos pronunciados.

Pueden diseñarse para aplicaciones que requieren entrega de energía a Temperaturas moderadas, hasta quizás 100 °C por encima de la temperatura ambiente. Usan radiación directa y difusa (Duffie y Beckman, 2013).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los colectores estacionarios.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Poco mantenimiento</b>	Generación de energía a menor temperatura
<b>Son mecánicamente más simples</b>	Mayores pérdidas de calor
<b>Cálculos de diseño, ecuaciones para el rendimiento son relativamente simples</b>	Menor intervalo en el rango de concentración

(Duffie y Beckman, 2013).

La importancia de los colectores de placa plana en los procesos térmicos es tal que su rendimiento se trata con gran detalle. Las partes importantes de un colector sin concentración, es la superficie de absorción de energía solar con medios para transferirla. energía absorbida a un fluido. Superficie absorbente que reduce la convección y las pérdidas de radiación a la atmósfera, aislamiento para reducir las pérdidas de conducción (Duffie y Beckman, 2013).

Aplicaciones:

- Calentamiento de agua.
- Calefacción de edificios.
- Aire acondicionado.
- Procesos industriales de calor.
- Producción química.
- Desalinización de agua salada.
- Desinfestación de plagas en suelos de invernadero.

### **1.4.3 Colectores con concentración**

Para muchas aplicaciones es deseable entregar energía a temperaturas más altas que las posibles con colectores estacionarios. Las temperaturas de entrega de energía pueden ser aumentadas, al disminuir el área desde donde se producen las pérdidas de calor.

Esto se hace interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie de absorción de energía. El absorbedor tendrá pérdidas de calor más pequeñas en comparación con un colector estacionario. Se han establecido muchos diseños para concentrar la energía. Los concentradores pueden ser reflectores o refractores, pueden ser cilíndricos o superficies de revolución, y pueden ser continuos.

O segmentados. Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos y pueden estar cubiertos o descubiertos, se usan varios modos de seguimiento. El área de apertura del colector y área de absorción, son los factores por los cuales el flujo de radiación en la superficie de absorción puede variar en varios órdenes de magnitud y operar en el extremo superior de la escala de la relación de concentración.

Los concentradores pueden tener relaciones de concentración desde valores bajos menores a la unidad hasta niveles altos valores del orden de 105.

Las proporciones crecientes significan temperaturas crecientes a las cuales se puede suministrar energía y aumentan los requisitos de precisión en calidad óptica y posicionamiento del sistema óptico (Duffie y Beckman, 2013).

Tabla 6. Ventajas y desventajas de un colector con concentración.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Menores pérdidas de calor</b>	Requiere seguimiento del sol
<b>Generación de energía a temperaturas más altas</b>	Mecánicamente más complejos
<b>Mayor flujo de radiación en la superficie de absorción de energía</b>	Mayor costo de mano de obra
<b>Mayor concentración de energía</b>	Mayor costo de construcción
<b>Mayor eficiencia</b>	

(Duffie y Beckman, 2013).

Además del objetivo principal de la producción de electricidad. Las tecnologías de energía solar concentrada ofrecen una gran variedad de aplicaciones para las que se puede aprovechar la energía solar térmica (David y Ruxandraz, 2011).

Aplicaciones:

- Procesos industriales de calor.
- Producción química.
- Desalinización de agua salada.
- Desinfestación de suelos de invernadero.
- Generación directa de vapor.

Configuraciones del colector de concentración

Muchos tipos de concentradores son posibles para aumentar el flujo de radiación en los receptores. Pueden ser reflectores o refractores. Pueden ser cilíndricos para enfocarse en una "línea" o circular para enfocar en un punto. En la figura 13 observamos los diferentes tipos de configuración.

(a) Absorbentes tubulares con reflector trasero.

(b) Absorbentes tubulares con reflectores de cúspide especulares.

(c) Receptor plano con plano.

(d) Concentrador parabólico.

(e) Reflector de Fresnel.

(f) Arsenal de heliostatos con central.

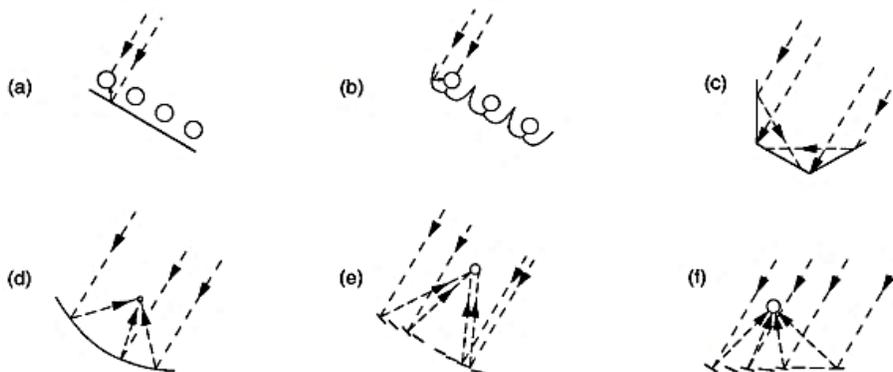


Figura 13. Configuraciones de concentración.

En general, los concentradores con receptores mucho más pequeños que la apertura son efectivos. Sólo en radiación directa. Es evidente también que el ángulo de incidencia de la radiación directa y del concentrador es importante y el seguimiento del sol dependiendo del tipo de concentrador (Duffie y Beckman, 2013).

#### **1.4.4 Colector solar con seguimiento en uno y dos ejes**

El colector se puede colocar en una orientación de dos formas: en el eje X, que se refiere a una colocación de este-oeste, de tal modo que requiere un menor ajuste durante el día y la abertura siempre se coloca frente al sol a medio día. Pero su rendimiento se ve reducido en el transcurso de la mañana a tarde debido a los ángulos de incidencia pronunciados. (Salgado, O. A. 2007, Colector de canal parabólico para calor de proceso, Título de Maestría, UNAM).

El seguimiento en 2 ejes sigue la trayectoria solar de norte a sur, pero tiene su mayor pérdida de eficiencia al medio día solar. En el periodo de un año, un campo de colectores orientado de norte-sur colecta más energía que un campo orientado este-oeste.

Sin embargo, el sistema norte-sur colecta mucha energía en el verano y muy poca en el invierno contrario a lo que sucede con un sistema de este-oeste. Además, la orientación norte-sur requiere de sistemas de seguimiento continuo lo que resulta en sistemas más complicados que los empleados en los sistemas orientados este-oeste (Salgado, O. A. 2007, Colector de canal parabólico para calor de proceso, Título de Maestría, UNAM).

#### **1.4.5 Principales tecnologías de concentración solar para la generación de vapor**

- Colectores de plato solar
- Torre solar
- Colector de canal parabólico

- Colector Fresnel

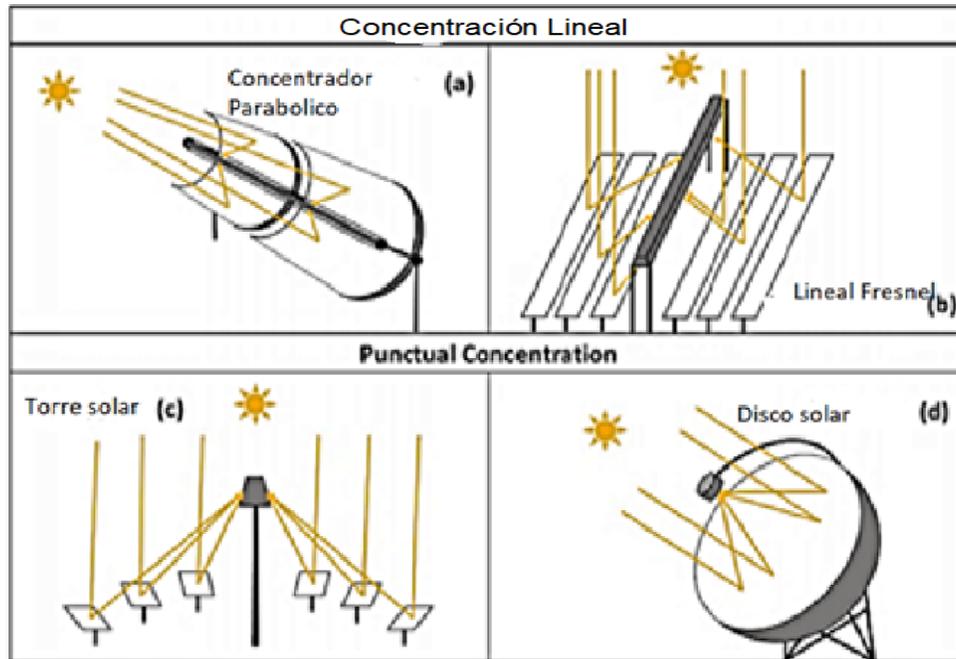


Figura 14. Concentración lineal y puntual (Giglioa, 2017).

En la figura 14, se observa las principales tecnologías para la generación directa de vapor, las más común es el concentrador parabólico, porque las otras tecnologías son relativamente nuevas y tiene mucho campo para el desarrollo de la concentración solar.

Los sistemas de cilindros parabólicos dominan el mercado global y son actualmente la tecnología más probada, siendo instalada alrededor del 81% de las plantas en funcionamiento y alrededor del 48% que están bajo construcción. Respecto a los sistemas de torre solar, existen alrededor del 14% del total de plantas que operan en todo el mundo, mientras que este porcentaje aumenta. Hasta un 28% para las plantas que actualmente están en construcción (Pérez y Prieto, 2015)

Tabla 7 Descripción y especificación de la tecnología de canal parabólico.

Tipo de Colector	Eficiencia termodinámica	Rango de temperatura de operación °C	Costo relativo	Relación de concentración	Madurez tecnológica	Rastreo
Colector de canal parabólico	Baja	50-400	Bajo	15-45	Muy maduro	Un eje

Nota: Lamina parabólica de material reflectante (aluminio, acrílico), receptor lineal (tubo de material con fluido de transferencia (David y Ruxandra, 2011).

Tabla 8 Descripción y especificación de la tecnología de colector fresnel.

Tipo de Colector	Eficiencia Termodinámica	Rango de temperatura de operación °C	Costo relativo	Relación de concentración	Madurez tecnológica	Rastreo
Colector fresnel	Baja	50-300	Muy bajo	10-40	Madura	Un eje

Nota: Conjunto lineal de espejos centrado en la torre o en una tubería de montaje alto como receptor (David y Ruxandra, 2011).

Tabla 9. Descripción y especificación de la tecnología de torre solar.

Tipo de Colector	Eficiencia termodinámica	Rango de temperatura de operación °C	Costo relativo	Relación de concentración	Madurez tecnológica	Rastreo
Torre Solar	Alta	300-2000	Alta	150-1500	Reciente	2 ejes

Nota: Gran campo de heliostatos con torre alta en su centro receptor puede usarse para almacenamiento térmico continuo (David y Ruxandra, 2011).

Tabla 10. Descripción y especificación de la tecnología de colectores de plato parabólico.

Tipo de Colector	Eficiencia Termodinámica	Rango de temperatura de operación °C	Costo relativo	Relación de concentración	Madurez tecnológica	Rastreo
Colectores de plato parabólico	Alta	150-1500	Muy alto	100-1000	Reciente	2 ejes

Nota: Gran plato parabólico reflectante con receptor en el punto focal, el calor produce electricidad directamente de la energía térmica reflejada (David y Ruxandra, 2011).

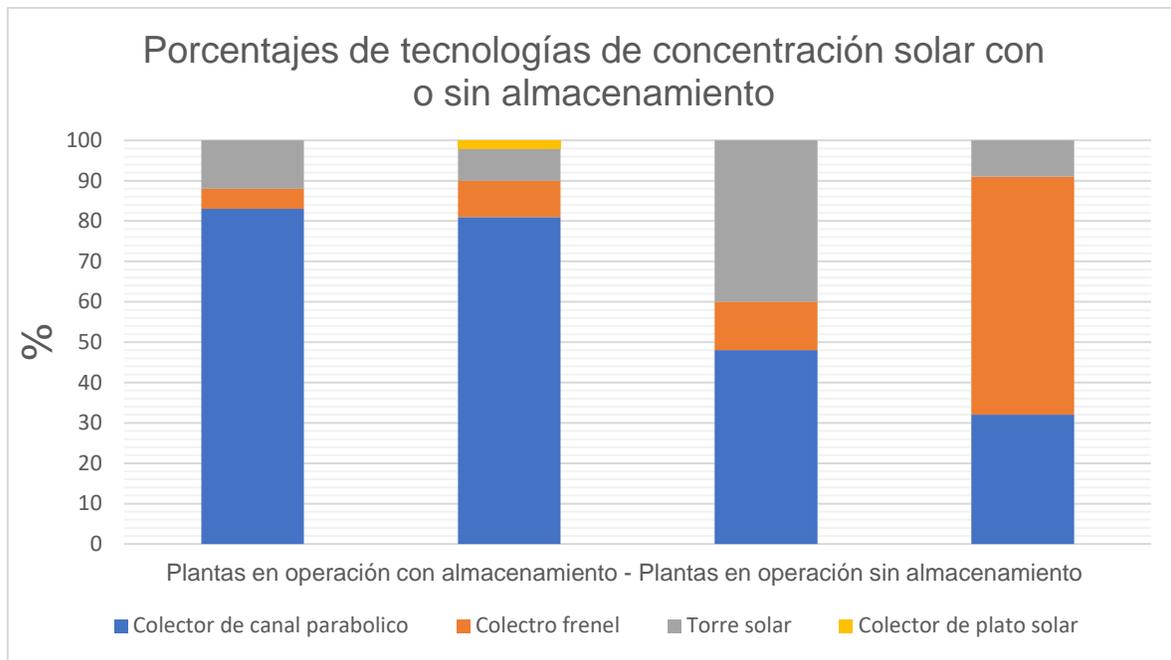


Figura 15. Energías de concentración solar con o sin almacenamiento de energía térmica (Giglio et. al, 2017).

### Concentración puntual

Los sistemas de concentración puntual tienen mayor relación de concentración, por lo tanto, son capaces de alcanzar temperaturas más altas, por encima de la temperatura ambiente.

Los reflectores generalmente deben ser orientados de modo que el eje y el sol estén alineados y, por lo tanto, deben poder moverse alrededor de dos ejes (Duffie *et. al*, 2017). Estos ejes pueden ser horizontales y verticales o un eje de rotación puede estar inclinado para que sea paralelo al eje de rotación de la Tierra (es decir, un eje polar) y el otro perpendicular a eso. Los sistemas de orientación pueden proporcionar ajustes continuos o casi continuos, con Movimiento del colector para compensar la posición cambiante del sol (Duffie y Beckman, 2013).

#### Colectores de plato parabólicos solar

Los sistemas parabólicos de platos consisten en un concentrador de foco de punto parabólico en forma de un plato que refleja la radiación solar sobre un receptor montado en el punto focal, pueden alcanzar índices de concentración de luz muy altos. (David *et. al*, 2015)

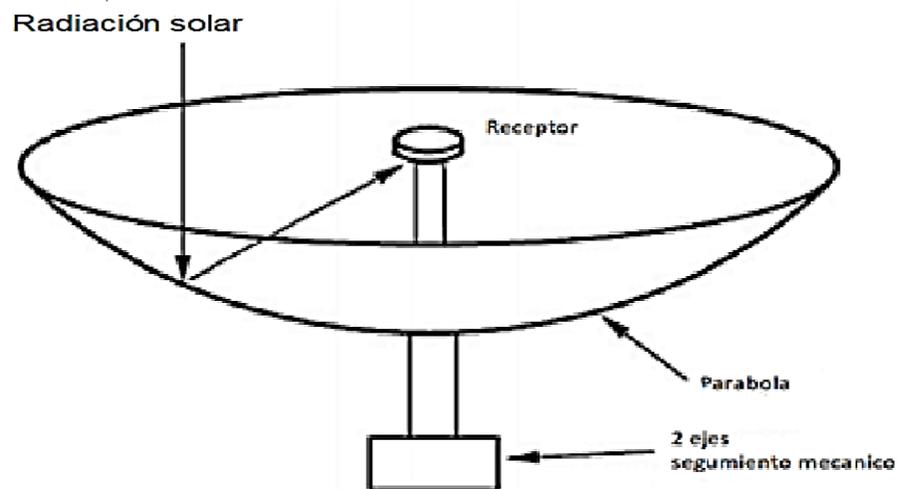


Figura 16. Colector de plato parabólico (David y Ruxandra, 2011).

Estos concentradores se montan en una estructura con un sistema de seguimiento de dos ejes para seguir al sol.

El calor recolectado normalmente se usa directamente por un calor montado en el receptor que se mueve con la estructura del plato (Pérez y Prieto, 2015).

#### Recolección de luz

Un receptor está montado y captando la radiación solar en forma de calor. Conecta los receptores de varios platos, conduciendo la energía térmica hacia un sistema central de generación de energía. Este diseño es menos conveniente ya que requiere tuberías bombeo, y en consecuencia sufre de transporte por pérdidas de calor (David et. al, 2011).

#### Torre central

La torre de energía solar convierte la luz solar en electricidad utilizando muchos espejos de seguimiento solar grandes, también llamados heliostatos, al centrar la luz en un receptor ubicado en la parte superior de una torre. El fluido de trabajo que fluye en el receptor, comúnmente sales fundidas o agua / vapor, se calienta con la luz solar y luego se usa en un generador de vapor convencional y una turbina para producir electricidad (Perez, D., Prieto, C. 2015).

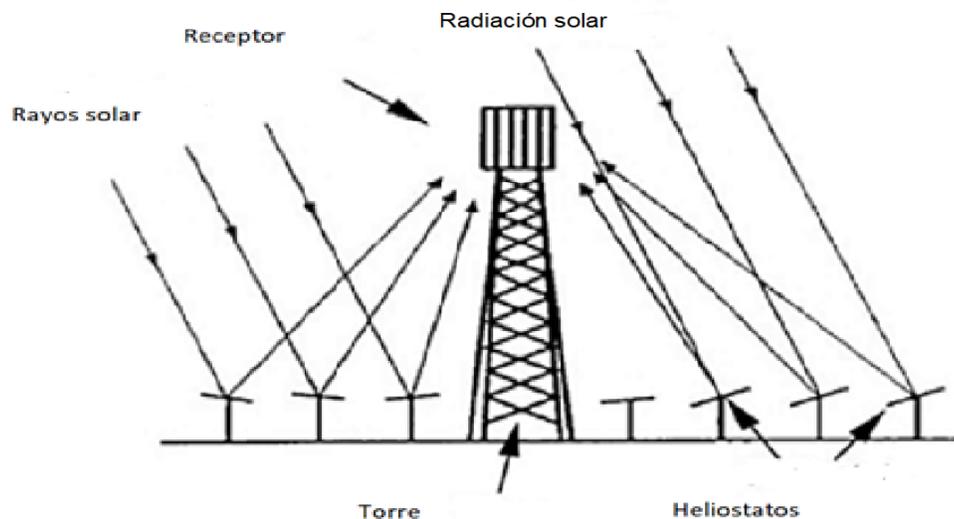


Figura 17. Torre solar (David y Ruxandra, 2011).

Los segmentos de espejo en los heliostatos pueden aumentar el flujo solar, aunque esto eleva los costos de fabricación. Cada heliostato está orientado individualmente para reflejar la luz incidente directamente en la unidad central receptora. Montando el receptor en una torre alta, disminuye la distancia que deben colocarse los espejos uno del otro. para evitar el sombreado. Las torres solares suelen tener una altura de aproximadamente 75–150 m. altura.

Un fluido que circula en un sistema de circuito cerrado pasa a través del receptor central, que absorbe la energía térmica para la producción de energía y el almacenamiento. Una ventaja es la gran cantidad de Radiación enfocada en un solo receptor (200–1000 KW / m<sup>2</sup>), la cual minimiza las pérdidas de calor y simplifica el transporte y almacenamiento de energía (Ruxandra y Pieter, 2011).

Esta es la tecnología de concentración puntual más viable comercialmente, generalmente se utiliza para generar vapor en la producción de energía eléctrica o turbinas de gas. Hay algunas torres solares conectadas a la red en funcionamiento alrededor del mundo. A partir de una economía de escala se requiere compensar los altos costos asociados a esta tecnología (Giglio *et. al*, 2017).

#### Concentración lineal

Los sistemas ópticos lineales, enfocarán la radiación directa al receptor si el sol está en el plano central del concentrador (el plano que incluye el eje focal y el vértice línea del reflector). Estos colectores se pueden girar alrededor de un solo eje de rotación, que puede ser norte-sur, este-oeste, o inclinado y paralelo al eje de la tierra (en cuyo caso la velocidad de rotación es de 15°/ h.

Existen diferencias significativas en la cantidad de haz incidente la radiación, su dependencia del tiempo y la calidad de imagen obtenida con estos tres modos de orientación.

Para algunos colectores lineales de baja concentración es posible ajustar su posición de forma intermitente, con cambios semanales, mensuales o estacionales posibles para algunos diseños (Duffie y Beckman, 2013).

#### Colector de canal parabólico

La tecnología de cilindros parabólicos es la tecnología de concentración más madura para el diseño de energía solar. Actualmente es utilizado por múltiples operaciones. La tecnología de canalización parabólica también se puede integrar con plantas de carbón o ciclos combinados (Pérez y Prieto, 2015).

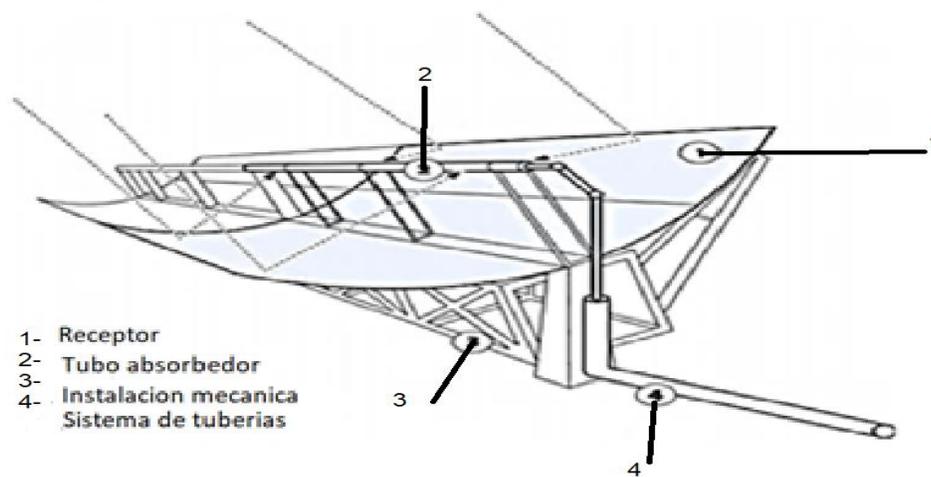


Figura 18. Colector de canal parabólico (David y Ruxandra, 2011).

Efectivamente producen calor a temperaturas que van desde 50 hasta 400 °C. Estas temperaturas son generalmente lo suficientemente altas para la mayoría de los procesos y aplicaciones a nivel industrial.

La gran mayoría de los cuales operan por debajo de 300°C, al igual para la investigación y desarrollo constante en la tecnología, y así poder generar más posibilidades de reducir su costo de operación y mantenimiento (David *et. al*, 2017).

Efectivamente producen calor a temperaturas que van desde 50 hasta 400 °C. Estas temperaturas son generalmente lo suficientemente altas para la mayoría de los procesos. Y aplicaciones a nivel industrial, la gran mayoría de los cuales operan por debajo de 300°C, al igual para la investigación y desarrollo constante en la tecnología, y así poder generar más posibilidades de reducir su costo de operación y mantenimiento (David *et. al*, 2017).

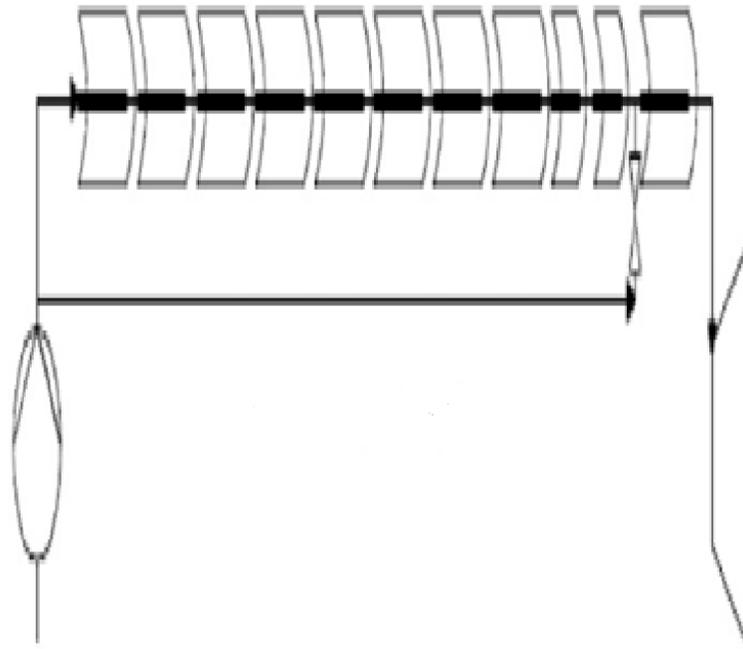


Figura 19. Sistema de concentración parabólica (Ruxandra y Pieter, 2011).

En la figura 19, el diseño del colector parabólico cuenta con estructuras ligeras y relativamente de alta eficiencia y las pistas de parábola.

Que enfocan el movimiento del sol, generalmente de este a oeste, con el eje del coleccionista alineado de norte a sur. Usualmente opera con receptores evacuados, que consiste en un tubo absorbente de metal, y un tubo concéntrico de vidrio externo al tubo metálico (Giglio *et. al*, 2017).

Un sistema de canal parabólico está compuesto por una hoja de material reflectante, generalmente acrílico plateado, que se dobla en una forma parabólica. Muchas de estas hojas se juntan en serie para formar canales largos.

Estos módulos son compatibles desde el suelo mediante simples pedestales en ambos extremos. Los módulos con forma tienen un enfoque lineal (línea focal) a lo largo del cual el receptor está montado (David, B., Ruxandra, V., Pieter, S. 2011).

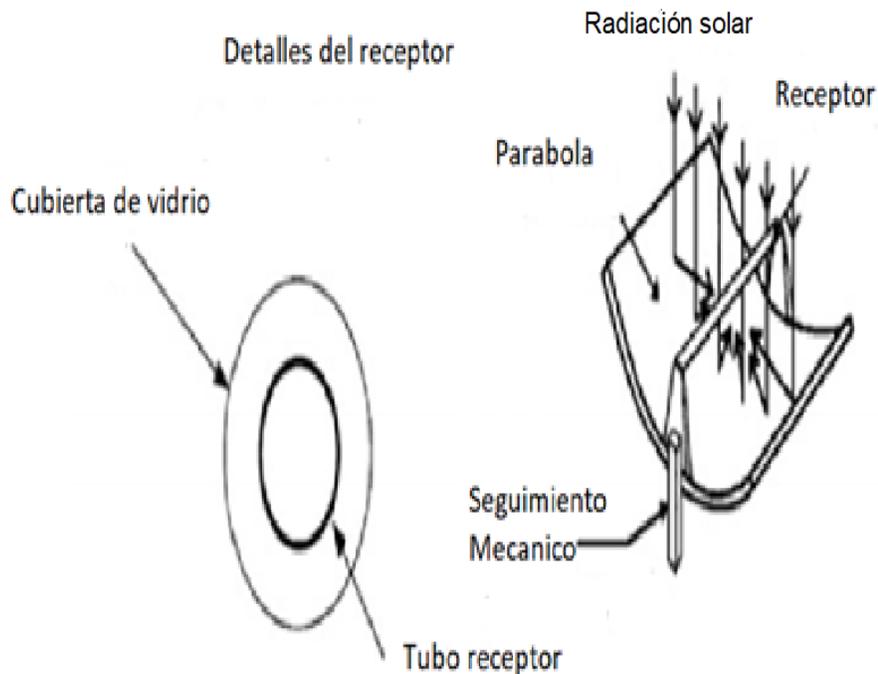


Figura 20. Receptor de un colector de canal parabólico (David y Ruxandra, 2011).

El receptor es generalmente un tubo de metal negro, encerrado en un tubo de vidrio para limitar la pérdida de calor por convección. La superficie del tubo a menudo se cubre con un recubrimiento selectivo que presenta alta absorbanza solar y baja emisión térmica.

El tubo de vidrio en sí está generalmente recubierto con un revestimiento anti reflejante para mejorar la transmisión de calor. Se puede aplicar un vacío en el espacio, entre el vidrio y las tuberías de metal para minimizar aún más el calor perdido y así aumentar la eficiencia del sistema (David y Ruxandra, 2011).

#### Colector Fresnel

Estos dispositivos reflectores son un conjunto de concentradores que están montados sobre una base de tubos y se mueven de acuerdo con la posición del sol. Los dos comparten principios comunes de operación.

En ocasiones, se agrega un pequeño espejo parabólico sobre el receptor para enfocar aún más la luz del sol (Pérez y Prieto, 2015).

Los reflectores lineales de Fresnel incorporan arreglos largos de espejos planos que concentran la luz en un receptor lineal. El receptor es montado en una torre (generalmente de 10 a 15 m de altura), suspendido arriba y a lo largo de matrices de reflectores. Los espejos se pueden montar en un dispositivo de seguimiento de dos ejes. La naturaleza plana y elástica de los espejos utilizados hace que el diseño sea significativamente más barato que el de canal parabólico. Además, las unidades del receptor central ahorran costos en el material del receptor, que generalmente son más altos que los costos del reflector (David y Ruxandra, 2011).

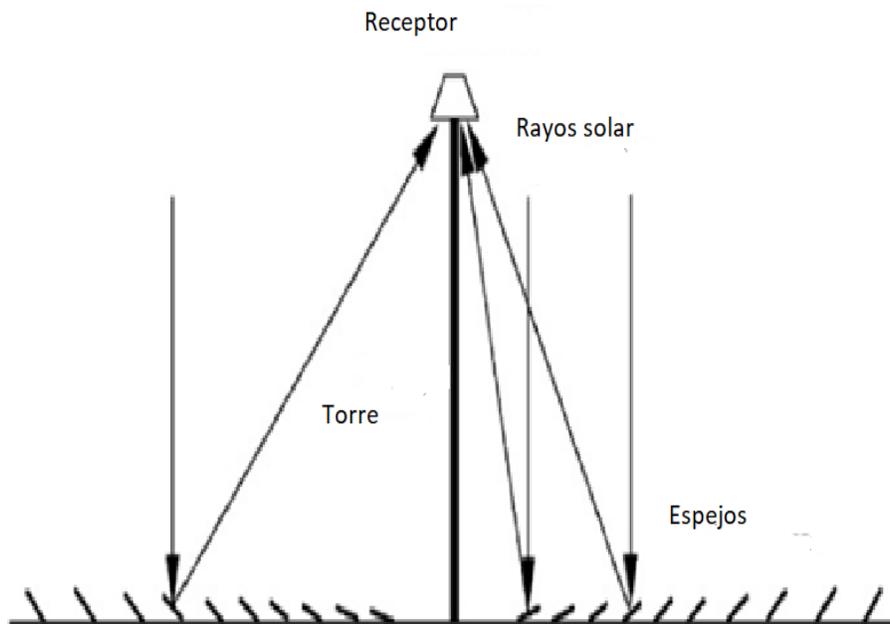


Figura 21 colector fresnel (David y Pieter, 2011).

### 1.5 Proceso de la generación directa de vapor (DSG)

Hay tres zonas en el campo solar relacionadas con el proceso DSG. Son la sección de precalentamiento, la sección de ebullición y la sección de sobrecalentamiento (Giglioa *et. al*, 2017).

- **Precalentamiento:** Es la sección de entrada de la energía solar, recibiendo agua de alimentación subenfriada. Es responsable de precalentar el agua hasta la temperatura de saturación.
- **Ebullición:** El agua saturada entonces entra en la sección de ebullición, que es responsable de producir vapor saturado o mezcla de agua saturada / vapor, dependiendo de la planta y el modo operacional.
- **Sobrecalentamiento:** La sección de sobrecalentamiento es la última parte del proceso, y es responsable de sobrecalentar el vapor hasta que estén adecuado para su aplicación específica.

### **1.5.1 Ventajas y desventajas de la generación directa de vapor**

En el caso de la concentración de energía solar, la generación directa de vapor a una temperatura constante, cuyo valor depende de la presión y temperatura de funcionamiento, caracteriza el proceso de evaporación. Los Fluidos de trabajo como sales fundidas o aceite térmico son los más usados en la actualidad, pero está claro que el agua se caracteriza por un menor riesgo ambiental. Por lo que, a pesar de estas evidentes ventajas, la implementación de la generación directa de vapor (DSG).

Se encuentra en las dificultades relacionadas con el control de flujo y la fabricación de equipos que se utilizarán en presencia de un flujo de dos fases (Giglioa *et. al*, 2017).

El campo solar tiene la tasa de costo más alta en tanto energía como términos de costo de capital. Para 2050 un cambio de paradigma en términos de producción, distribución y uso de la energía debe estar alineado con un consumo total de energía que viene en gran parte de tecnologías renovables.

Sin embargo, hay un fuerte desajuste entre el suministro de energía renovable y la demanda del usuario. Los sistemas de almacenamiento de energía están diseñados para acumular energía, pero cuando la producción supera la demanda y la pone a disposición del usuario. Pueden ayudar a igualar el suministro y la demanda de energía, explotar la producción en variable de fuentes de energía renovable (Perez y Prieto, 2015).

La generación directa de vapor se ha convertido en el interés principal de investigación para colectores de canal parabólico en los últimos años, los estudios sobre los colectores Fresnel en esta área son crecientes. Este proceso se puede usar para producir vapor, para procesos industriales y vapor para alimentar una turbina en una planta de energía eléctrica (Giglioa *et. al*, 2017).

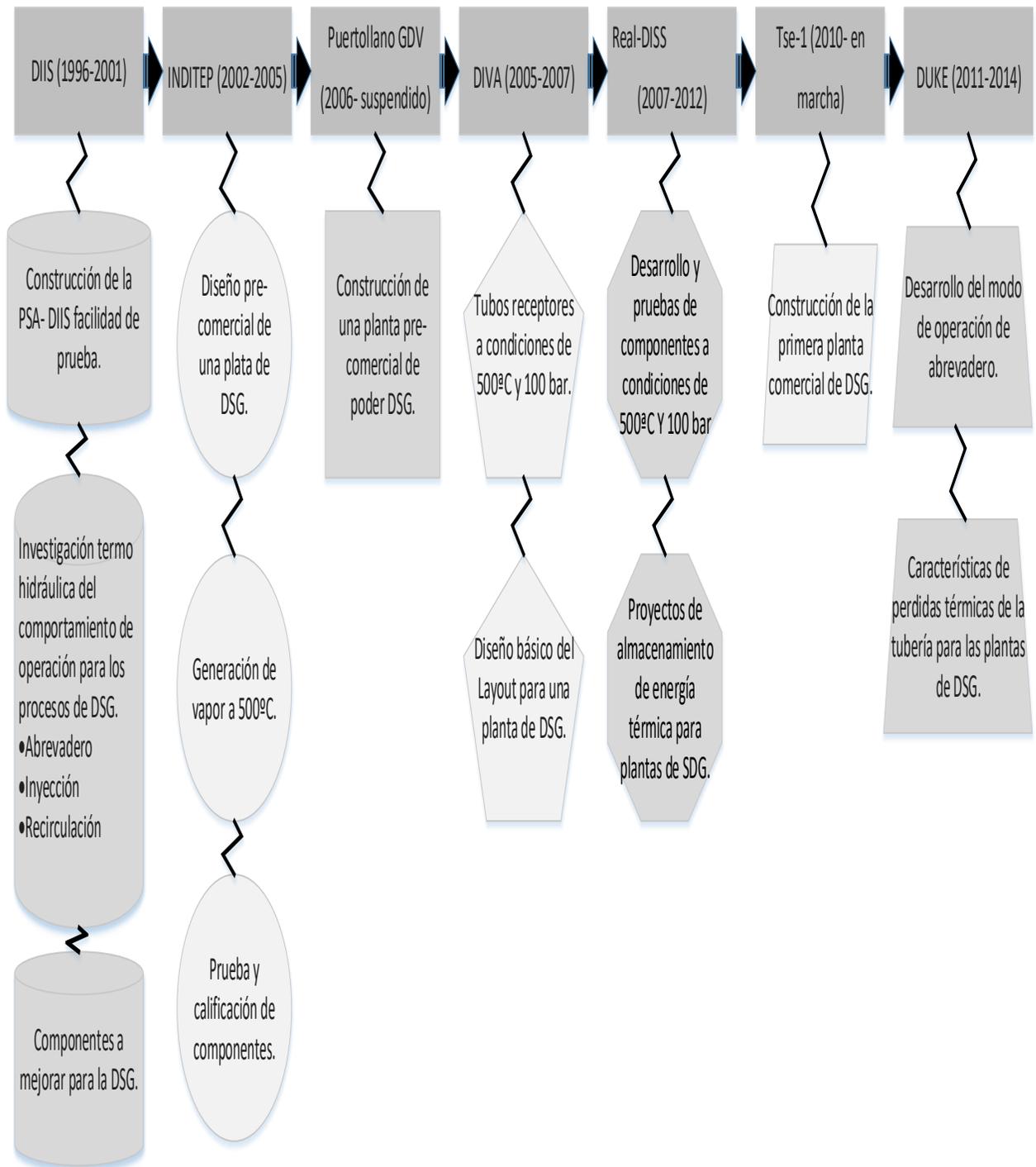


Figura 22. Principales tareas y resultados de los principales proyectos de generación directa de vapor (Giglia et. al, 2017).

### 1.5.2 Modos de operación

Hay tres modos operativos principales para DSG; el abrevadero, inyección y recirculación (Giglio *et. al*, 2017).

- Abrevadero: Es generalmente relacionado con la condición operativa nominal. En esto el campo solar se alimenta con agua subenfriada y el precalentamiento, la ebullición y el sobrecalentamiento se produce en un pasaje directo. Aunque el concepto es simple, durante el funcionamiento real, este modo demostró ser complejo y costoso, y no ha funcionado bien durante los experimentos.
- Inyección: Consiste en inyectar agua de alimentación en varios puntos a lo largo del campo solar, con el fin de controlar la salida de vapor.  
Este modo complejo y costoso presentó resultados insatisfactorios debido a las dificultades para mantener el control.
- Recirculación: Consiste en separar el campo solar en dos partes, una para el precalentamiento y la ebullición, y la otra para el sobrecalentamiento del vapor. Las dos partes están unidas por un separador de agua, que está conectado a la salida del precalentamiento y sección de ebullición, y a la entrada de la sección de sobrecalentamiento.

El vapor puro es extraído separándolo del agua en estado bifásico (alta presión, pero temperatura media): esta aparente restricción revela en realidad ser una oportunidad, ya que deja la opción de dividir el campo en un evaporador y un bloque sobrecalentado (Chiarappa, 2015)

Hay inyecciones de agua de alimentación en la sección de sobrecalentamiento para controlar esta condición de salida de vapor sobrecalentado.

Este último modo operacional es altamente controlable; sin embargo, presenta mayores cargas parasitarias debido a la mayor recirculación del agua (Giglioa *et. al*, 2017).

Tabla 11. Condiciones de sal fundida y agua / vapor para la generación de vapor.

<b>Fluido</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión absoluta bar</b>
<b>Sal caliente</b>	565	12
<b>Sal fría</b>	288	2.3
<b>Vapor sobre calentado</b>	550	130
<b>Vapor saturado o calentado</b>	548	27

(Chiarappa, T. 2015).

La pobre capacidad térmica del agua impulsa, sin embargo, el diseño de la tecnología a trabajar con presiones altas, del orden  $P_{max} = (100)$  bar. Estas características afectan directamente a toda la tubería y, obviamente, al elemento colector de calor (Chiarappa, T. 2015).

Otra variable importante es el control de temperatura de la salida, se realiza a través del control de área enfocada, vapor flujo másico y control de enfriamiento. Se ha demostrado que se logra una buena estabilidad de la temperatura incluso en días con transitorios de irradiancia relativamente altos (Giglioa *et al.*, 2017).

El estrés térmico en concentradores solares lineales es un tema importante. de estudio, por la forma en que la radiación concentrada llega al receptor.

Prácticamente solo la mitad del receptor recibe radiación concentrada, el efecto del estrés térmico es aún más importante por dos razones.

Las presiones de proceso más altas conducen a las paredes del tubo, que aumenta el gradiente de temperatura en el tubo. Otro factor agravante está relacionado con la aparición de flujo multifase (Giglioa *et. al*,2017).

### 1.5.3 Importancia de la eficiencia óptica para la DSG

La eficiencia óptica del colector es claramente un factor crucial para decidir qué tecnología usar. Aspectos como la reflectividad del espejo, la precisión del rastreador, la limpieza de los componentes y durabilidad de las propiedades ópticas son de gran importancia para obtener la eficiencia necesaria para la generación de vapor (Giglioa *et. al*, 2017).

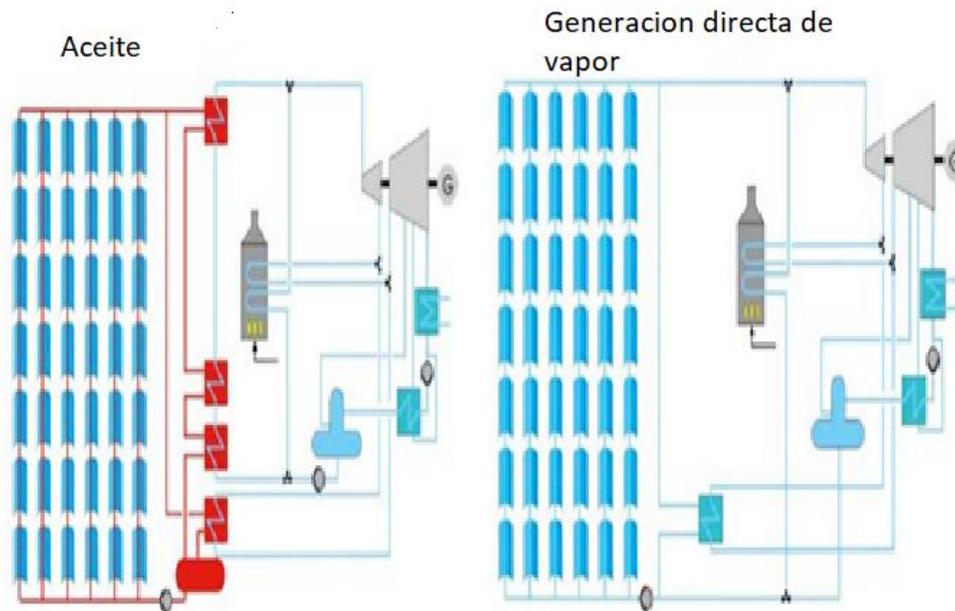


Figura 23 comparación de un diseño de planta solar para tecnología de petróleo (izquierda) y DSG (derecha) (Chiarappa, 2015).

Los receptores solares, y los colectores de calor de temperatura media y alta, se han fabricado para optimizar los rendimientos de cada línea. Sin embargo, es necesario comprender los fenómenos de flujo a dos fases dentro de los receptores solares. Para que la DSG se convierta en una tecnología factible, todavía hay algunos aspectos generales para ser optimizados, si bien parece obvio preservar la alta eficiencia termodinámica operando en condiciones muy altas (P, T), sería fructífero desarrollar un nuevo diseño de planta para reducir la operación y el mantenimiento, pero más que otros, revela la necesidad de diseñar y desarrollar un sistema eficiente y rentable (Chiarappa, 2015).

Tabla 12. Ventajas y desventajas de la generación directa de vapor.

Ventajas	Desventajas
<p><b>En el proceso DSG, el fluido de trabajo es agua, y el precalentamiento, la ebullición y el sobrecalentamiento ocurre dentro de los tubos del absorbedor. Esto elimina la necesidad de intercambiadores de calor entre el fluido de trabajo de la energía solar de campo y el fluido del ciclo de Rankine, y permite operar a Temperaturas más altas, aumentando la eficiencia global del sistema.</b></p>	<p>Inestabilidades relacionadas con el flujo de dos fases y la reducción del enfriamiento de la pared interna, según el patrón de flujo de dos fases.</p>

Continuación. Tabla 12 Ventajas y desventajas de la generación directa de vapor.

<p><b>Las ventajas reportadas pueden disminuir los costos de producción de energía en alrededor del 15% en comparación con Plantas de aceite térmico.</b></p>	<p><b>Las estrategias de control para DSG son también más complejo, debido a las temperaturas más altas y la tarea de mantener constante la producción de vapor.</b></p>
<p><b>Además de mayor temperatura final en el campo solar. La salida y la simplificación de la distribución de la planta, el uso de agua durante el cambio de fase permite una reducción sustancial de la temperatura media en el cual el calor se transfiere al fluido.</b></p>	<p>El comportamiento del flujo bifásico dentro de la</p> <p>Los tubos absorbentes de un colector de canal parabólico obligan a la implementación de un sistema de control más costosos y al uso de sistemas de control rápidos.</p>
<p><b>También a muy altas temperaturas de vapor, la principal parte del calor requerido se transfiere durante la transición de fase a una Temperatura más baja, en comparación con la máxima, lo que permite una reducción de las pérdidas térmicas en comparación con el uso de un calor sensible.</b></p>	<p>Otro problema relacionado con el DSG es el alto valor del vapor. La presión dentro de los tubos receptores que debe coincidir con la entrada de los equipos genera caídas en la presión. De hecho, el manejo de los móviles y componentes flexibles que forman el tubo receptor del colector para valores de alta presión fue uno de los principales problemas a enfrentar.</p>

Continuación. Tabla 12 ventajas y desventajas de la generación directa de vapor.

<p><b>Reducir la complejidad para la concentración de plantas de energía solar.</b></p>	<p><b>Desarrollar sistemas para el control del flujo y el diseño de equipos, para manejar el flujo de dos fases en los tubos de absorción.</b></p>
<p><b>Los sistemas de concentración pueden lograr un amplio rango de relaciones de concentración, desde la unidad hasta más de 10,000 sol.</b></p>	<p>Los materiales reflectantes utilizados en las tecnologías deben cumplir ciertos requisitos de reflectividad y por vida para ser rentable.</p>
<p><b>Elimina la necesidad de fluidos de transferencia de calor intermedios.</b></p>	<p>Dentro del campo solar, el diseño de la planta requiere altas presiones, por lo tanto, una tubería más gruesa y por lo tanto un aumento apreciable de los costos: este problema económico representa uno de los inconvenientes que afectan a la tecnología DSG.</p>
<p><b>Los costos de inversión se reducen debido a la eliminación de equipos intermedios.</b></p>	<p>La eficiencia en el ciclo termodinámico para la producción de vapor; estarán sujetos a altas pérdidas térmicas.</p>

Continuación. Tabla 12 ventajas y desventajas de la generación directa de vapor.

<p><b>El agua permite alcanzar una temperatura muy alta <math>T_{max} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, sin embargo, a una presión bastante alta debido a su baja capacidad térmica.</b></p>	<p><b>DSG permite potencialmente alimentar directamente la turbina, evitando así la inserción de un intercambiador de calor y, en consecuencia, aumenta la eficiencia de la planta y reducir costos de operación.</b></p>
<p></p>	<p>La temperatura de operación puede superar los <math>400\text{ }^{\circ}\text{C}</math> en comparación con las plantas de aceite térmico.</p>
<p></p>	<p>El agua es menos corrosiva, lo que reduce los costos de mantenimiento en comparación con los demás fluidos de trabajo.</p>

(Duffie y Beckman, 2013).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **Objetivo general:**

Desarrollar un generador de vapor solar de alta eficiencia térmica para obtener vapor de baja presión y establecer las condiciones óptimas de operación, diseñando un concentrador parabólico con un arreglo de recirculación para evitar menores pérdidas térmicas al ambiente y aumentar la transferencia de calor.

### **Objetivos particulares**

- Construir un generador de vapor solar con materiales accesibles y de bajo costo.
- Diseño del concentrador desmontable para facilitar mantenimiento y mantener la eficiencia óptica diseñada.
- Determinar la eficiencia térmica de un tubo absorbedor comercial de cobre.
- Analizar el desempeño de alimentar el agua a evaporar al centro del absorbedor comercial, mediante un arreglo de doble tubo concéntrico.
- Evaluar las relaciones de concentración con 1, 2 y 3 espejos para determinar la relación de concentración con mayor eficiencia.

### **2.1 Planteamiento materiales y método**

Las pruebas experimentales se realizaron con 3 relaciones de concentración diferentes, una por cada perfil con el que se evaluaron los tiempos de residencia en cada corrida, buscando las condiciones de temperatura y presión ideales para obtener un tiempo de residencia hidráulico constante.

Variables de control:

- Tiempo de residencia hidráulico.
- Irradiación solar.
- Temperatura de entrada del agua.

Variables de respuesta:

- Masa evaporada.
- Eficiencia térmica.

Experimentación

Primera parte: Analizar la influencia de la temperatura inicial en la generación directa de vapor con diferentes tiempos de residencia y diferentes temperaturas de entrada calculando los números de Reynolds para cada corrida.

Segunda parte: Conociendo la influencia de la temperatura inicial para cada número de Reynolds, se realizarán corridas con diferentes volúmenes de entrada, para analizar que combinación nos genera una mayor eficiencia.

### **2.1.1 Diseño y construcción**

La construcción y diseño del concentrador parabólico de energía solar, se realizó con materiales de menor costo posible, pero de alta eficiencia. El calor es removido por un fluido de trabajo, en este caso agua, que fluye a través del receptor.

Para reflejar la irradiación solar al receptor ocupamos una lámina de aluminio comercial llamada MIRO-SUN, para refractar la luz hacia el área mas pequeña que es el tubo absorbedor, ya que la radiación solar se concentra generando una mayor densidad de flujo radiactivo por unidad de área.

Los perfiles del colector solar se diseñaron en AUTO CAD, el cual los recubrimos con lamina de aluminio para generar una mayor estabilidad en el equipo.

La línea focal que se forma mediante el doblado de la lámina en la cual colocamos un tubo que cuenta con una superficie absorbente con cubierta selectiva, cuenta con una alta absorbancia para la radiación solar y una baja emitancia para evitar pérdidas térmicas al ambiente. Este tubo está confinado por un tubo de vidrio como envolvente lo que nos ayuda a disminuir las pérdidas de calor, en el interior se colocó un tubo de acero inoxidable para diseñar un arreglo concéntrico y tener una recirculación del fluido de trabajo para hacer más eficiente la transferencia de calor.

En las figuras 22 y 23 observamos el diseño del concentrador parabólico completamente armado, donde vemos el arreglo concéntrico con la finalidad de aumentar la transferencia de calor.



Figura 24. Concentrador parabólico.



Figura 25. Recirculación del concentrador parabólico.

- Como se observa en la figura 25, la estructura de soporte y los perfiles del equipo son de madera, cortadas con láser, para optimizar el funcionamiento del equipo al tener una mejor eficiencia de reflexión solar.
- Para la parte mecánica del equipo seleccionamos acero inoxidable 304, para cuidar la durabilidad del equipo, además es fácil de limpiar. La construcción se secciono en 3 bloques para tener mayor facilidad al desmontar para su mantenimiento.
- Para reducir pérdidas de calor, se diseñó un arreglo de doble tubo concéntrico en el cual una tubería de 1.25 pulgadas (nominales) contiene a la de alimentación (0.75 pulgadas, nominales).
- Se instalo un medidor de presión y temperatura marca Fluke a la salida del equipo, con los que se tomaron las temperaturas de salida para realizar los balances de energía.

- Durante la experimentación utilizamos un radiómetro marca Kipp&Zonnen para poder medir la radiación a lo largo del equipo y realizar los cálculos de transferencia de calor.



Figura 26. Perfiles del concentrador parabólico.

### 2.1.2 Diseño Mecánico

Con el diseño mecánico del colector de canal parabólico, generamos menos pérdidas térmicas en la concentración de energía, además la recirculación nos ayuda a elevar la eficiencia en la transferencia de energía y reducir los tiempos de calentamiento.

Para la construcción mecánica se indentifica la presión máxima de operación de cada instrumento ya sea de medición o tubería.

Es importante mencionar que, al trabajar con un fluido bifásico, no se debe exceder la presión de operación de un componente, ya que se podría tener una ruptura en el sistema o tener problemas en su funcionamiento y control.

Para poder desmontar, limpiar y dar mantenimiento a nuestro colector de canal parabólico, se debe seccionar la parte mecánica por bloques para buscar una mayor maleabilidad del equipo.

Como se mencionó, la selección del material para la parte mecánica fue el Acero tipo 304 debido a su resistencia a la corrosión, conformado en frío y soldabilidad, sus aplicaciones son amplias y es uno de los materiales más comunes, ya sea para la construcción de estructuras, para la industria de alimentos e industria química en la tabla 13.

Tabla 13. Acero inoxidable 304 especificación a diferentes temperaturas.

<b>Temperatura ° C</b>	<b>Acero inoxidable tipo</b>	<b>Presión máxima de operación</b>	<b>Diámetro nominal (pulgadas)</b>	<b>Diámetro nominal (pulgadas)</b>	<b>Diámetro nominal (pulgadas)</b>
<b>-29 a + 38</b>	304	10,840	0.5	0.75	1.25
<b>93</b>	304	9,590	0.5	0.75	1.25
<b>149</b>	304	8,640	0.5	0.75	1.25
<b>204</b>	304	7,860	0.5	0.7	1.25
<b>260</b>	304	7,180	0.5	0.75	1.25

Tabla 14. Especificación del bloque 1.

<b>Material (Acero inoxidable)</b>	<b>Medida nominal (pulgadas in)</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Oliva</b>	0.75	1
<b>Válvula check</b>	0.75	1
<b>Cuerda</b>	0.75	2
<b>Válvula globo</b>	0.75	1
<b>Tuerca unión</b>	0.75	1

En la tabla 14 identificamos los componentes mecánicos de entrada del bloque 1, es el más pequeño porque principalmente es la entrada de agua al concentrador, se compone de la oliva donde se conectó el embudo para las pruebas y las válvulas que su función principal es que el fluido vaya en una sola dirección y no retorne por donde entra.

Tabla 15. Especificaciones del bloque 2.

<b>Material (Acero inoxidable)</b>	<b>Medida nominal (pulgadas in)</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Unión T</b>	1.25	1
<b>Niple</b>	1.25 - 0.75	2

Continuación. Tabla 15 Especificaciones del bloque 2.

<b>Cuerda</b>	<b>1.25</b>	<b>1</b>
<b>Tuerca unión</b>	1.25	1
<b>Niple</b>	0.75	4
<b>Tuerca unión</b>	0.75	2
<b>Unión T</b>	0.75	2
<b>Válvula compuerta</b>	0.75	1
<b>Reducción</b>	0.75 - 0.5	1
<b>Reducción</b>	0.5 - 0.25	1
<b>Termómetro</b>	0.25	1

En el bloque 2 se instalaron las tuercas unión para poder hacer nuestro arreglo concéntrico, como se menciona anteriormente colocamos un tubo de acero en el interior de un tubo comercial con una envolvente de en vidrio. Toda la línea de instrumentación es del diámetro del tubo de acero al igual que el indicador de temperatura para eso se hizo una reducción de con un niple de 1.25 a 075 pulgadas.

Tabla 16. Especificaciones del 3 bloque.

<b>Material (Acero inoxidable)</b>	<b>Medida nominal (pulgadas in)</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Unión T</b>	1.25	1
<b>Reducción</b>	1.25 - 0.75	1
<b>Niple</b>	1.25	1
<b>Tuerca unión</b>	1.25	1
<b>Olivas</b>	0.75	4
<b>Codo 90 °</b>	0.75	2
<b>Reductor</b>	1.25 – 0.75	1
<b>Tuerca unión</b>	0.75	1
<b>Unión T</b>	0.75	1
<b>Niple</b>	0.75	2
<b>Reductor</b>	0.75 – 0.5	1
<b>Tapón</b>	0.5	1

Para el bloque 3 se secciono la parte de la recirculación a la salida del tubo comercial se instaló una recirculación para poder aprovechar el agua caliente que pasa por la sección transversal del concentrador para después volver a pasar por el tubo de acero 304 y salir, en la figura 26 podemos el diseño mecánico de la recirculación.



Figura 27. Arreglo doble tubo parabólico.

# DTI

## GENERADOR DE VAPOR SOLAR

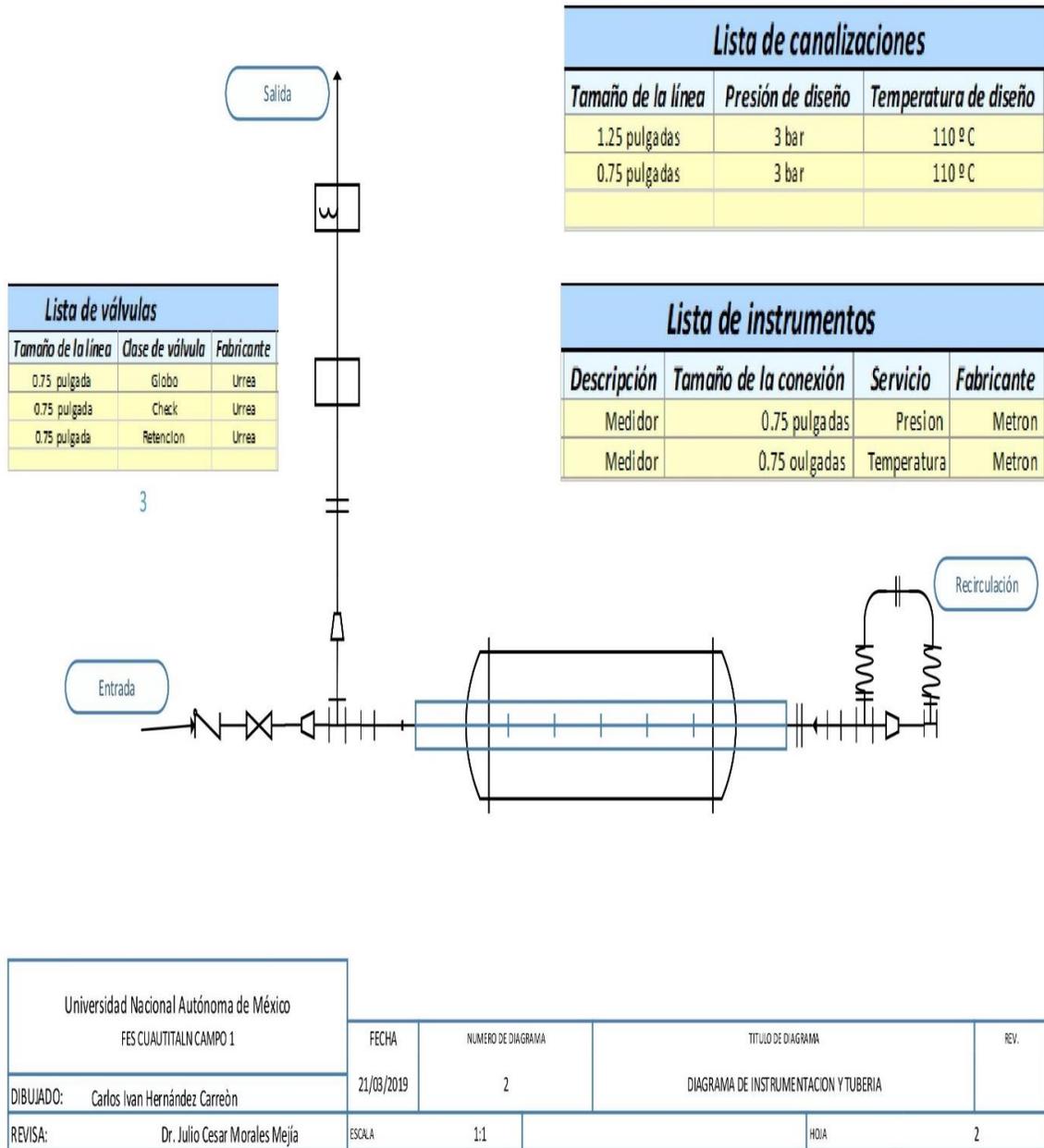


Figura 28. Diagrama instrumentación y tuberías.

## Pasos para desmontar el sistema

En la figura 28 podemos ver el DTI del concentrador, para desmontar el equipo solo necesitamos quitar las tuercas unión de entrada que seccionan el bloque 1 y 2, para el bloque 3 que es la recirculación de igual manera retiramos la tuerca unión de la salida.

1. Desmontar la tuerca unión de 12.5 in de la entrada del tubo comercial para poder desmontar el bloque 1 y 2.
2. Desmontar la reducción de 1.25 a 0.75 pulgadas del bloque 2.
3. Desmontar la tuerca unión de 0.75 pulgadas para separar el bloque 2 y bloque 1 que son del mismo diámetro.
4. Desmontar la tuerca unión de 1.25 pulgadas del bloque 3 que está directamente conectada a la salida del tubo absorbedor.
5. Desmontar la reducción de 1.25 a 0.75 pulgadas del bloque 3 para retirar la recirculación.

### **2.1.3 Espejos Miro - SUN**

Su principal función es reflejar de manera eficiente la radiación solar directa captada para que se produzca su concentración en el foco. El material de la lámina debe contar con ciertas características esenciales para un mejor rendimiento, como una alta reflectancia, que se define como:  $\rho$  (porcentaje de radiación incidente que es reflejada), y con aptitudes para resistir la intemperie.

En la figura 15 podemos ver la comparación a de los materiales que se usaron para los primeros concentradores hasta los más actuales, como podemos ver el aluminio tiene altos porcentajes de reflectancia y es el más barato en comparación con los demás.

Tabla 17. Reflectancia de los materiales más usados para concentradores de energía.

<b>Material</b>	<b>Reflectancia P (%) (Cachorro,1997)</b>	<b>Reflectancia P (%) (Morales,1997)</b>	<b>Reflectancia P (%) (Fend et al., 2000)</b>	<b>Reflectancia P (%) (Ibáñez et al., 2005)</b>
<b>Plata</b>	94	92-94	–	96
<b>Aluminio</b>	82-92	85	88-91	85-91
<b>Cobre</b>	75	–	–	–
<b>Vidrio</b>	–	92	–	94

La reflectancia se calcula sobre superficies no expuestas a las inclemencias del tiempo ni a la suciedad, la continua limpieza también va dañando los materiales reflectantes, en la mayoría de los casos, la corrosión era el factor más limitante para asegurar una larga vida útil al material en condiciones de exposición al exterior.

Tabla 18. Propiedades de distintos materiales para superficies reflectoras.

<b>Material</b>	<b>Reflectancia P (%)</b>	<b>Precio (euro/m2)</b>	<b>Durabilidad años</b>
<b>Plata (SolarBrite-95)</b>	92	17-52	Menos de 2
<b>Aluminio (Miro SUN)</b>	89-90	<23	Mas de 4
<b>Vidrio plateado delgado</b>	93-96	17-47	Mas de 2

(Fend *et al.*, 2003).

En la tabla 16 se hace una comparación con la lámina que se instaló en el concentrador MIRO SUN, podemos ver que en comparación con otros materiales que se usan en la actualidad tenemos un porcentaje alto de reflectancia, no el más alto, pero se compara con su precio al ser el más barato.

La lamina que utilizamos lleva un proceso llamado anodización la oxidación eléctrica de las superficies metálicas se denomina anodización. Esto implica un proceso electroquímico para transformar sistemáticamente la superficie de aluminio en óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) en su estado de vidrio.

Sus principales características son:

Una alta dureza como la cerámica, altamente transparente y se utilizan donde se requieren superficies estables y resistentes a largo plazo con el fin de obtener un porcentaje alto de reflectancia y la empresa que la fábrica se llama: ALANOD.

Este material nos proporciona aproximadamente el 95% del reflejo de luz total, gracias a una capa de nanocompuestos resistente a la intemperie; se desarrolló específicamente para uso en exteriores, ofrece un 90% de reflexión solar y un 95% de reflexión total de la luz y es ideal para su uso en colectores de tubos (CPC), plantas de energía parabólica (CSP), canales micro parabólicos (CST), concentradores fotovoltaicos (CPV), cocinas solares y heliostatos.

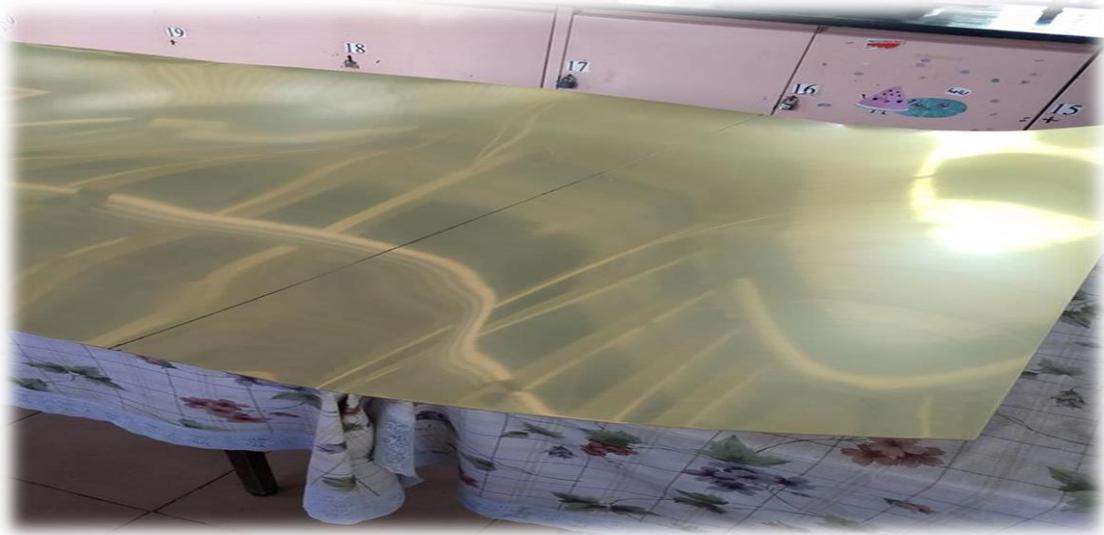


Figura 29. Lámina miro-sun.

#### **2.1.4 Tubo evacuado (absorbedor)**

Se define como el elemento absorbente o receptor que está constituido por un elemento metálico (acero inoxidable), y se sitúa en el foco de concentración de la radiación solar. Por su interior circula el fluido portador del calor que aumentará su temperatura como consecuencia de la radiación concentrada en el absorbedor.

Geoméricamente, el receptor puede ser una barra plana, un tubo de forma elíptica o un tubo cilíndrico. Este último es el más usado para aplicaciones térmicas y normalmente está protegido por otro tubo concéntrico de vidrio (Pyrex).

La forma geométrica del receptor influye en la razón de concentración del colector, también influye en la eficiencia el diámetro del tubo, aumentando la primera al disminuir el segundo.

Las características de absorbanza y emitancia del absorbedor son similares a las exigidas en la placa captadora de un panel solar plano: se desea una alta absorbanza y una baja emitancia.

El tubo comercial que utilizamos es de la empresa Inventive power, los porcentajes de absorbanza y emitancia son mayores al 90%, por lo que son buenos parámetros para un equipo concentrador de energía, de igual manera nos ayuda que en el interior está el tubo de acero inoxidable 304, para aprovechar la energía concentrada en la generación de vapor y reducir las pérdidas térmicas al ambiente.

Tabla 19. Características del tubo comercial absorbedor.

<b>Longitud</b>	<b>2,000 mm</b>
<b>Diámetro del tubo absorbedor</b>	30 mm
<b>Diámetro de cristal</b>	102 mm
<b>Absortividad</b>	$\geq 0.94$
<b>Emisividad</b>	$\leq 0.6$ (80 °C); $\leq 0.12$ (80°C)
<b>Transmitancia</b>	$\geq 0.95$
<b>Temperatura de operación</b>	300 °C
<b>Presión máxima de operación</b>	1.5 MPA
<b>Peso</b>	6 kg

## 2.2 Diseño óptico del colector de canal parabólico

Para el diseño óptico del concentrador cilíndrico parabólico que pertenece a la familia de los concentradores de foco lineal y su funcionamiento se basa aprovechando las propiedades de reflexión de una parábola. Concentra la radiación solar que incide sobre su apertura hacia el foco de la parábola, donde se sitúa un absorbente (tubo cilíndrico), por cuyo interior circula el fluido de trabajo.

Tabla 20. Características de los concentradores solares según el flujo energético que pueden producir.

<b>Tipo de concentrador solar</b>	<b>Irradiación (W/m)</b>
<b>Estático parabólico compuesto</b>	1,000-2,000
<b>Cuasi estático parabólico compuesto</b>	2,000-10,000
<b>Cuasi estático cilíndrico parabólico</b>	2,000-10,000
<b>Cilíndrico parabólico de seguimiento en un eje</b>	10,000-100,000

(Ibáñez *et. al*, 2005).

Para el diseño de la parte óptica necesitamos conocer las medidas de la lámina con la que se construyó los 3 perfiles para las pruebas experimentales. El tipo de concentrador diseñado es de seguimiento en un eje, pero principalmente de característica cuasi estático.

Tabla 21. Medidas de lámina miro sun.

<b>Medidas lámina</b>	<b>Centímetros</b>
<b>Ancho (W)</b>	179 cm
<b>Largo (L)</b>	200 cm

Para poder diseñar la parte óptica es importante conocer el principio geométrico de una parábola, “conjunto de los puntos de un plano que equidistan de un punto y de una recta fijos dados en el plano” (Thomas, Finney, 1984).

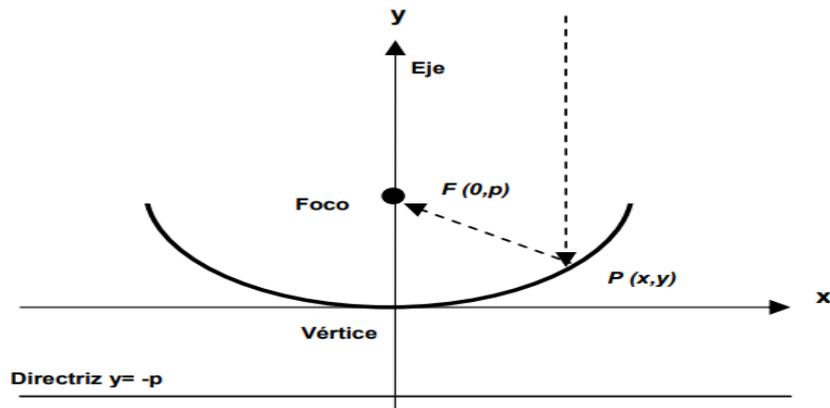


Figura 30. Principios geométricos de la parábola.

Como se observa en la figura 30 el punto fijo se llama foco de la parábola y la recta directriz. El eje de simetría de la curva se denomina eje de la parábola. El punto medio del eje entre el foco y la directriz está sobre la parábola y se llama vértice.

En la figura 30 se puede observar una parábola abierta hacia arriba en donde el origen coincide con el vértice, es la posición en donde colocaremos nuestro colector cilíndrico parabólico.

### 2.2.1 Relación de concentración

Los rayos que inciden paralelos al eje de la parábola se reflejan en el foco de esta. Esta es la propiedad que se aprovecha para concentrar los rayos solares en el foco de la parábola. Esta relación es también denominada (razón de concentración). Cuanto mayor es la razón de concentración más precisa ha de ser la óptica del concentrador, pero la concentración geométrica depende de la forma del receptor y las dimensiones de la superficie reflectora.

La relación de concentración se define con la siguiente ecuación:

$$RC = \frac{A_{\text{Apertura}}}{A_{\text{Recoleccion en el tubo}}}$$

Donde el área de apertura se expresa de la multiplicación entre la longitud por la amplitud de la lámina.

$$A_{\text{Apertura}} = (W)(L)$$

W = amplitud de lámina.

L = longitud de malina.

El área de recolección del tubo esta expresada por la multiplicación del diámetro y la longitud del tubo absorbedor. En la tabla 17 tenemos las especificaciones del tubo absorbedor.

$$A_{\text{Recoleccion en el tubo}} = 2(\pi)(r)(L)$$

L = longitud del tubo absorbedor.

r = radio del tubo absorbedor.

Para el cálculo de las relaciones de concentración variamos la amplitud de la lámina de acuerdo con los perfiles con los que se realizaron las pruebas experimentales.

En el apéndice A, están los cálculos para las relaciones de concentración. En general no resulta fácil lograr que la concentración alcance el máximo teórico por las siguientes causas:

- La radiación incidente no se refleja en su totalidad.
- Errores ópticos debido a irregularidades en la fabricación de la superficie reflectora.

- Defecto de forma como consecuencia de la rigidez del elemento que determina la estructura del concentrador.
- Como consecuencia de estos factores los concentradores cilíndricos parabólicos no alcanzan la concentración geométrica máxima y eso influye en el rendimiento del colector.

Tabla 22 relaciones de concentración.

Perfiles para experimentación	Relación de concentración (RC).
1	5
2	14
3	18

### 2.2.2 Eficiencia óptica

Además de la concentración geométrica, para definir las propiedades del concentrador se utiliza el concepto de concentración óptica (CO), también llamada eficacia óptica que se define como:

$$CO = \frac{E_{\text{Disponible en el plano de apertura}}}{E_{\text{absorbida en el receptor}}}$$

La eficacia óptica del concentrador, CO, depende del producto transmitancia-absortancia del receptor ( $\tau\alpha$ ), de la reflectancia de la superficie reflectora,  $\rho$ , y del factor de interceptación, y proporción de rayos disponibles en la apertura cuyas trayectorias son interceptadas por el absorbente. En general, como ya se ha comentado, la eficacia óptica es función del ángulo de incidencia de la radiación sobre el plano del concentrador y de los errores de seguimiento y configuración tanto de la parábola como del absorbent

### **CAPÍTULO 3. ANALÍISIS Y RESULTADOS**

En las tablas 23, 24 y 25, se muestran los resultados de los cálculos para el número adimensional con sus relaciones de concentración refiriendo al número de perfiles con los que se hizo la experimentación.

Como se observa en los resultados iniciar las pruebas con una temperatura mayor a los 298 K, nos genera números de Reynolds más elevados por lo que la temperatura inicial influye en la generación directa de vapor, sin importar el tiempo de las pruebas experimentales observamos que los números adimensionales más altos se dieron con menos tiempo en las réplicas experimentales.

Con relación a los perfiles en la experimentación era de esperar que el número adimensional más grande sea con la relación de concentración de 18, ya que con los 3 perfiles el equipo calentó de manera más rápida y como vemos en la tabla 23, fue la prueba con menor tiempo de residencia. El objetivo de las pruebas era ver si la temperatura inicial tiene influencia en la generación directa de vapor por lo que podemos confirmar que, si influye. Además de considerar factores de gran importancia como una eficiente captación a las horas cercanas al medio día solar, que son las horas del día donde tenemos mayor irradiación.

Es importante mencionar que para equipos de un eje es un poco deficiente la captación a lo largo del día, al no tener seguimiento solar no podemos tener buena generación de vapor por largos lapsos de tiempo.

Tabla 23. Resultados número adimensional con 1 perfil.

RC = 5	Parámetro	Replica 1	Replica 2	Replica1	Unidades
Nombre		12/08/2019	13/08/2019	2/08/2019	
Hora de Inicio de Prueba	$H_i$	12:05:00 p. m.	12:50:00 p. m.	13:25:00 p. m.	Hora/min
Hora Final de Prueba	$H_F$	13:00:00 p. m.	13:50:00 p. m.	14:07:00 p. m.	
Área de receptor	$A_R$	0.017	0.0179	0.0179	$m^2$
Área de colector	$A_C$	0.0009971	0.00009971	0.00009971	$m^2$
Diámetro Equivalente	$D_{equi}$	0.019	0.019	0.019	m
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	298.15	301.15	301.15	°K
Temperatura de Entrada	$T_{ent}$	298.15	301.15	301.15	°K
Temperatura de Salida	$T_{sali}$	365.15	365.15	365.15	°K
Volumen de entrada	$V_{ent}$	0.00075	0.001266	0.00078	$m^3$
Densidad del agua	$\rho_{agua}$	997.8	997.5	996.2	$\frac{kg}{m^3}$
Tiempo de Residencia	$T_{ores}$	2580	3600	5760	Seg
Viscosidad dinámica	$\mu_{agua}$	0.00089	0.0008324	0.0008324	$\frac{kg}{m * seg}$

Continuación. Tabla 23 resultados número adimensional con 1 perfil.

Radiación	Ra	937	1028.2	938	$\frac{W}{m^2}$
Velocidad de entrada	$V_0$	0.000291543	0.003526895	0.001358105	$\frac{m}{seg}$
Flujo masico de entrada	$m_{ent}$	0.000290058	0.000350788	0.000134902	$\frac{kg}{seg}$
Numero de Reynolds	$R_e$	6.210262177	80.30210364	30.88171921	N/A

Tabla 24. Resultados número adimensional con 2 perfil.

RC = 14	Parámetro	28/08/2019	30/08/2019	23/08/2019	Unidades
Nombre					
Hora de Inicio de Prueba	$H_i$	12:15:00 p. m.	11:38:00 a. m.	13:30:00 p. m.	Hora/minutos
Hora Final de Prueba	$H_F$	14:17:00 p. m.	14:15:00 p. m.	13:57:00 p. m.	
Área de receptor	$A_R$	0.017	0.0179	0.0179	$m^2$
Área de colector	$A_C$	0.0009971	0.00009971	0.00009971	$m^2$
Diámetro Equivalente	$D_{equi}$	0.019	0.019	0.019	$m$
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	295.15	296.15	303.15	$^{\circ}K$

Continuación. Tabla 24 resultados número adimensional con 2 perfil.

<b>Temperatura de Entrada</b>	$T_{ent}$	<b>295.15</b>	<b>296.15</b>	<b>303.15</b>	<b>°K</b>
<b>Temperatura de Salida</b>	$T_{sali}$	365.15	365.15	365.15	°K
<b>Volumen de entrada</b>	$V_{ent}$	0.003898	0.004	0.000604	$m^3$
<b>Densidad del agua</b>	$\rho_{agua}$	997.8	997.5	995.6	$\frac{kg}{m^3}$
<b>Tiempo de Residencia</b>	$T_{ores}$	7200	9000	1620	Seg
<b>Viscosidad dinámica</b>	$\mu_{agua}$	0.0009544	0.0009321	0.0007972	$\frac{kg}{m * seg}$
<b>Radiación</b>	Ra	879	893	594.8	$\frac{W}{m^2}$
<b>Velocidad de entrada</b>	$V_0$	0.000542963	0.004457371	0.003739239	$\frac{m}{seg}$
<b>Flujo masico de entrada</b>	$m_{ent}$	0.000540198	0.000443333	0.000371199	$\frac{kg}{seg}$
<b>Numero de Reynolds</b>	$R_e$	10.78542572	90.63225025	88.72671584	N/A

Tabla 25. Resultados número adimensional con 3 perfil.

RC = 18	Parámetro	15/02/2020	08/02/2020	08/02/2020	Unidades
<b>Nombre</b>					
<b>Hora de Inicio de Prueba</b>	$H_i$	10:50:00 a. m.	11:42:00 a. m.	13:25:00 p. m.	Hora/minutos
<b>Hora Final de Prueba</b>	$H_F$	11:55:00 a. m.	12:38:00 p. m.	14:07:00 p. m.	
<b>Área de receptor</b>	$A_R$	0.0179	0.0179	0.0179	$m^2$
<b>Área de colector</b>	$A_C$	0.0009971	0.0009971	0.0009971	$m^2$
<b>Diámetro Equivalente</b>	$D_{equi}$	0.019	0.019	0.019	$m$
<b>Temperatura Ambiente</b>	$T_{amb}$	296.15	301.15	306.15	$^{\circ}K$
<b>Temperatura de Entrada</b>	$T_{ent}$	296.15	301.15	306.15	$^{\circ}K$
<b>Temperatura de Salida</b>	$T_{sali}$	365.15	365.15	365.15	$^{\circ}K$
<b>Volumen de entrada</b>	$V_{ent}$	0.00198	0.0012	0.00153	$m^3$

Continuación. Tabla 25. Resultados número adimensional con 3 perfil.

<b>Densidad del agua</b>	$\rho_{agua}$	<b>997.5</b>	<b>996.2</b>	<b>994.7</b>	$\frac{kg}{m^3}$
<b>Tiempo de Residencia</b>	$T_{0res}$	3900	3360	2520	Seg
<b>Viscosidad dinámica</b>	$\mu_{agua}$	.0.0009321	0.0008324	0.000748	$\frac{kg}{m * seg}$
<b>RC = 18</b>	Parámetro	15/02/2020	08/02/2020	08/02/2020	Unidades
<b>Nombre</b>					
<b>Radiación</b>	Ra	633.3	212.7	694	$\frac{W}{m^2}$
<b>Velocidad de entrada</b>	$V_0$	0.000509169	0.003581816	0.006089087	$\frac{m}{seg}$
<b>Flujo masico de entrada</b>	$m_{ent}$	0.000506423	0.000355786	0.000603925	$\frac{kg}{seg}$
<b>Numero de Reynolds</b>	$Re$	10.35299166	81.44629242	153.8495729	N/A

Para la energía disponible en el plano de apertura calculamos la radiación solar con un sensor infrarrojo proporcionado por el programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario (PEMBU), donde medimos los valores de radiación solar a lo largo de las pruebas experimentales.

Para después con ayuda del software ORIGIN PRO-8, integramos con respecto al tiempo de las réplicas experimentales para obtener la energía disponible en el plano de apertura

$$E_{\text{Disponible en el plano de apertura}} = \int_0^t \text{rad } dt$$

En la tabla 26, tenemos una corrida experimental para calcular la energía disponible, como se observó medimos la radiación solar a lo largo de la prueba donde cada intervalo de 2 minutos tomábamos el cambio de temperatura, tardamos en calentar porque la prueba se hizo con un perfil, por lo que nuestra relación de concentración era baja, pero a lo largo de la prueba mantuvimos una buena generación directa de vapor por un lapso de 40 minutos, lo que es importante notar es que la temperatura inicial era alta para un día soleado.

En la figura 29, podemos ver la relación de la irradiación con respecto al tiempo, la pendiente positiva nos dice que la energía disponible aumenta con rapidez en el transcurso de la prueba, se debe a la hora en que se realizó la prueba, ya que fue cercana al medio día de solar que es de las 12 pm a 3 pm, donde hay mayor concentración de energía a lo largo del día.

Tabla 26. Cinética térmica prueba experimental.

Tiempo de prueba RC = 5	Temperatura	Tiempo (seg)	Irradiación $\frac{W}{m^2}$	Irradiación Integral $\frac{J}{m^2 \cdot seg}$	Condición de insolación	Fase
11:43	38	4218 0	212	0	Despejado	Calentamiento
11:45	40	4230 0	221	26024	Despejado	Calentamiento
11:48	42	4248 0	233	66920	Despejado	Calentamiento
11:50	44	4260 0	241	95424	Despejado	Calentamiento
11:52	46	4272 0	249	124920	Despejado	Calentamiento
11:54	49	4272 0	249	124920	Despejado	Calentamiento
11:56	53	4296 0	266	186888	Despejado	Dilatación
11:58	58	4308 0	274	219360	Despejado	Dilatación

Continuación. Tabla 26 Cinética térmica prueba experimental.

<b>12:00</b>	<b>64</b>	<b>4320</b> <b>0</b>	<b>283</b>	<b>252824</b>	<b>Despeja</b> <b>do</b>	<b>Dilatación</b>
<b>12:02</b>	82	4332 0	280	286604	Despeja do	Dilatación
<b>12:03</b>	88	4338 0	278	303359	Despeja do	GDV
<b>12:04</b>	90	4344 0	277	320024	Despeja do	GDV
<b>12:06</b>	92	4356 0	274	353084	Despeja do	GDV
<b>12:10</b>	92	4380 0	268	418124	Despeja do	GDV
<b>12:12</b>	92	4392 0	265	450104	Despeja do	GDV
<b>12:15</b>	92	4410 0	260	497399	Despeja do	GDV
<b>12:18</b>	92	4428 0	256	543884	Despeja do	GDV
<b>12:20</b>	92	4440 0	253	574424	Despeja do	GDV

Continuación. Tabla 26 Cinética térmica prueba experimental

<b>12:22</b>	<b>92</b>	<b>4452</b> <b>0</b>	<b>250</b>	<b>604604</b>	<b>Despeja</b> <b>do</b>	<b>GDV</b>
<b>12:24</b>	92	4464 0	247	634424	Despeja do	GDV
<b>12:26</b>	92	4476 0	244	663884	Despeja do	GDV
<b>12:28</b>	92	4488 0	241	692984	Despeja do	GDV
<b>12:30</b>	92	4500 0	238	721724	Despeja do	GDV
<b>12:32</b>	92	4512 0	254	751256	Despeja do	GDV
<b>12:34</b>	92	4524 0	270	782732	Despeja do	GDV
<b>12:36</b>	92	4536 0	286	816152	Despeja do	GDV
<b>12:38</b>	92	4548 0	302	851516	Despeja do	GDV
<b>12:40</b>	92	4560 0	319	888824	Despeja do	GDV



Figura 31. Grafica de irradiación vs tiempo a lo largo de la prueba.

La energía absorbida en el receptor se calculó con el siguiente balance de energía.

$$E_{\text{absorbida en el receptor}} = \dot{m}_e * c_p * (T_f - T_i) + \dot{m}_v * (\lambda_{\text{liq sat}} - \lambda_{\text{vap sat}})$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{liq}}$  = flujo masico de entrada.

$c_p$  = capacidad calorifica especifica.

$T_i$  = temperatura de entrada.

$T_f$  = temperatura de salida.

$\dot{m}_v$  = flujo masico de salida.

$\lambda_{\text{liq sat}}$  = entalpia de liquido saturado.

$\lambda_{\text{vap sat}}$  = entalpia de vapor saturado.

Conociendo la energía útil realizamos el cálculo de la eficiencia.

$$C_o = \frac{E_{\text{Disponible}}}{E_{\text{Util}}}$$

En las figuras 27, 28 y 29, se observa que las mejores eficiencias fueron con 2 perfiles en la tabla 26, la eficiencia más alta fue de 19.24 %, con un tiempo de experimentación de 2 horas en comparación con las pruebas de 3 perfiles las eficiencias no pasaron del 13 %, pero las pruebas no fueron tan prolongadas en tiempo, se debe a que el equipo con los 3 perfiles teníamos menores tiempo de residencia experimentales, pero más perdida de energía al ambiente. Como se mencionó el diseño y los materiales de construcción son factores muy importantes para tener altas eficiencias en los concentradores solares, el factor principal que se observa con 3 perfiles, fue el mismo peso de los espejos empezó a deformar el vértice y el foco de la parábola, la misma estructura del equipo, eso nos generaba un menor aprovechamiento de la energía disponible. Con 2 espejos el equipo no sufría deformaciones durante las pruebas, se aprovechaba mejor la irradiación solar y la generación directa de vapor era constante.

Los equipos parabólicos de concentración solar realmente no alcanzan eficiencias mayores al 25 %, ya que al ser de un eje son un poco limitante para la concentración de solar, no tienen un seguimiento solar en 2 ejes que los haga ser más eficientes, como se nota en la tabla 7, el intervalo para la relación de concentración va de 15-45, nuestra relación fue de 18. Se esperaba que las eficiencias fueran bajas.

Pero lo que más nos afectó fue el material con los que se construyó los perfiles, ya que la madera al pasar las pruebas se empezó a picar y perder su resistencia estructural.

El arreglo de doble tubo para la generación directa de vapor fue de ayuda porque el agua realmente calentaba rápido en las pruebas con 1, 2 y 3 perfiles. Las figuras 32 y 33 son las gráficas de eficiencia con respecto al tiempo, nos dicen que en el transcurso de la experimentación la eficiencia se mantuvo constante, ya que es el punto máximo de la transferencia de energía, se observa que en las figuras 34 y 35, se alcanza el pico en menor tiempo que con 1 y 2 perfiles.

En los resultados de ambas partes experimentales, nos dice que la mejor combinación para tener un tiempo de residencia hidráulico constante, es mayor volumen de entrada y temperaturas de entrada más altas a 25°C.

En comparación con otros trabajos similares. Salgado, O. A. (2007), Colector de canal parabólico para calor de proceso, Título de Maestría, UNAM, Ciudad de México, México.

Las eficiencias que se observan en las réplicas experimentales con 2 y 3 perfiles son similares, no cercanas al 25% como en el trabajo de maestría, pero se debe a que el material para la construcción y el seguimiento solar son factores importantes para obtener eficiencias más elevadas, ya que como se menciona al momento de hacer las pruebas con 3 perfiles la parábola se deformaba y por esta razón la relación de concentración disminuyó lo que explica por que con 2 espejos tenemos los valores más altos de eficiencias en las pruebas experimentales.

En el trabajo. Venegas, E. (2013), Diseño, Construcción y evaluación de un arreglo de concentradores de canal parabólico para calor de proceso, UNAM, Ciudad de México, México. El proceso de diseño fue más selectivo para los materiales y cálculos para la deformación que podría tener la estructura por el viento. Sus eficiencias ópticas fueron mejores en comparación con las obtenidas experimentalmente. El desarrollo con

materiales de alta resistencia y un sistema de seguimiento solar efectivo nos generan mayor eficiencia óptica, además de considerar factores externos que los equipos sufren estando a la intemperie con las cargas del viento que afectan la estructura del equipo.

Los parámetros de diseño para los concentradores parabólicos de energía solar son sumamente importantes porque nos generan una garantía de poder obtener altas eficiencias ópticas y térmicas, además de considerar la efectiva captación de irradiación solar para la generación del vapor.

Tabla 27. Resultados de eficiencias con 1 perfil.

RC= 5 Fecha: replica Nombre	Parámetro	12/08/2019	12/08/2019	08/02/2020	08/02/2020	08/02/2020	Unidades
Hora de inicio de Prueba	$H_i$	12:07:00 p. m.	01:02:00 p. m.	11:43:00 a. m.	12:43:00 p. m.	13:27:00 p.m.	Hora

Continuación. Tabla 27. Resultados de eficiencias con 1 perfil.

<b>Hora de Final de Prueba</b>	$H_f$	<b>12:59:00 p.m.</b>	<b>01:39:00 p.m.</b>	<b>12:40:00 p.m.</b>	<b>13:23:00 p.m.</b>	<b>14:07:00 p.m.</b>	<b>Hora</b>
<b>Tiempo de Prueba</b>	$T_{ex}$	3120	2220	3420	2400	2400	Seg
<b>Área Disponible</b>	$A_d$	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	$m^2$
<b>Flujo masico de entrada</b>	$\dot{m}_e$	0.0002403	0.0004234	0.0003508	0.00045	0.006375	$\frac{kg}{seg}$
<b>Flujo masico de vapor</b>	$\dot{m}_v$	0.0001538	0.0001981	0.0002345	0.0002916	0.0004166	$\frac{kg}{seg}$
<b>Flujo masico de agua Caliente</b>	$\dot{m}_c$	0.0000865	0.0002252	0.0001175	0.0001583	0.0002208	$\frac{kg}{seg}$
<b>Energía Disponible</b>	$E_d$	24351.58	4991.78	6073.04	2684.8	8634.03	$\frac{J}{seg}$
<b>Energía útil</b>	$E_{util}$	5464.58	1121.25	632.8	695.1	2662.22	$\frac{J}{seg}$
<b>Eficiencia</b>	$C_o$	4.45	4.45	9.6	3.86	3.24	N/a

Figura 32 grafica de eficiencia 3.86% con 1 perfil.

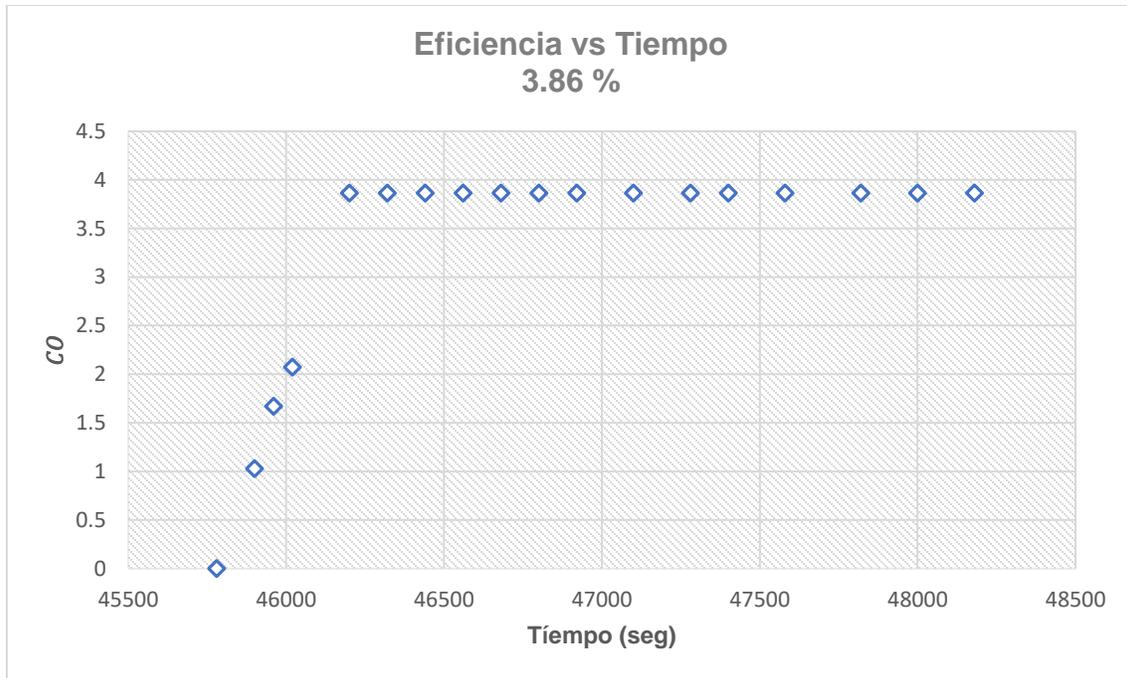


Figura 33 grafica de eficiencia 9.6% con 1 perfil.

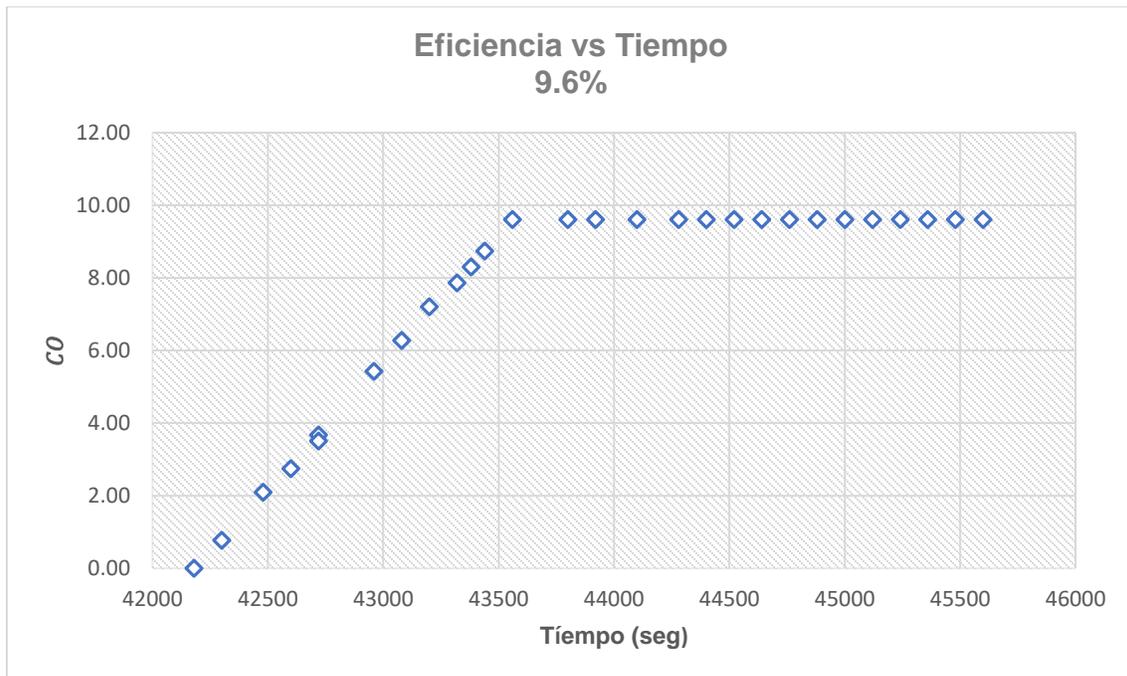


Tabla 28. Resultados de eficiencias con 2 perfiles.

RC= 14 Fecha: replica Nombre	Parámetro	21/08/2019	21/08/2019	28/08/2019	30/08/2019	07/09/2019	Unidades
Hora de inicio de Prueba	$H_i$	12:10:00 p.m.	13:53:00 p.m.	12:17:00 p.m.	11:40:00 a.m.	11:30:00 a.m.	Hora
Hora de Final de Prueba	$H_f$	12:45:00 p. m.	14:53:00 p.m.	14:17:00 p.m.	14:15:00 p.m.	13:12:00 p.m.	Hora
Tiempo de Prueba	$T_{ex}$	2100	3600	7200	9300	6120	Seg
Área Disponible	$A_d$	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	$m^2$
Flujo masico de entrada	$\dot{m}_e$	0.0008142	0.0001972	0.0005414	0.0004301	0.0005196	$\frac{kg}{seg}$
Flujo masico de vapor	$\dot{m}_v$	0.0005142	0.0001194	0.0003222	0.0002956	0.0003267	$\frac{kg}{seg}$
Flujo masico de agua caliente	$\dot{m}_c$	0.0003	0.0000777	0.0002192	0.0001344	0.0001928	$\frac{kg}{seg}$

Continuación. Tabla 28. Resultados de eficiencias con 2 perfiles

<b>Energía Disponible</b>	$E_d$	<b>12447.36</b>	<b>5737.38</b>	<b>16695.74</b>	<b>14139.69</b>	<b>8561.57</b>	$\frac{J}{seg}$
<b>Energía útil</b>	$E_{util}$	1436.23	33	867.6	811.74	605.22	$\frac{J}{seg}$
<b>Eficiencia</b>	$C_o$	8.66	17.36	19.24	17.41	14.14	N/a

Figura 34 grafica de eficiencia 8.66% con 2 perfiles.

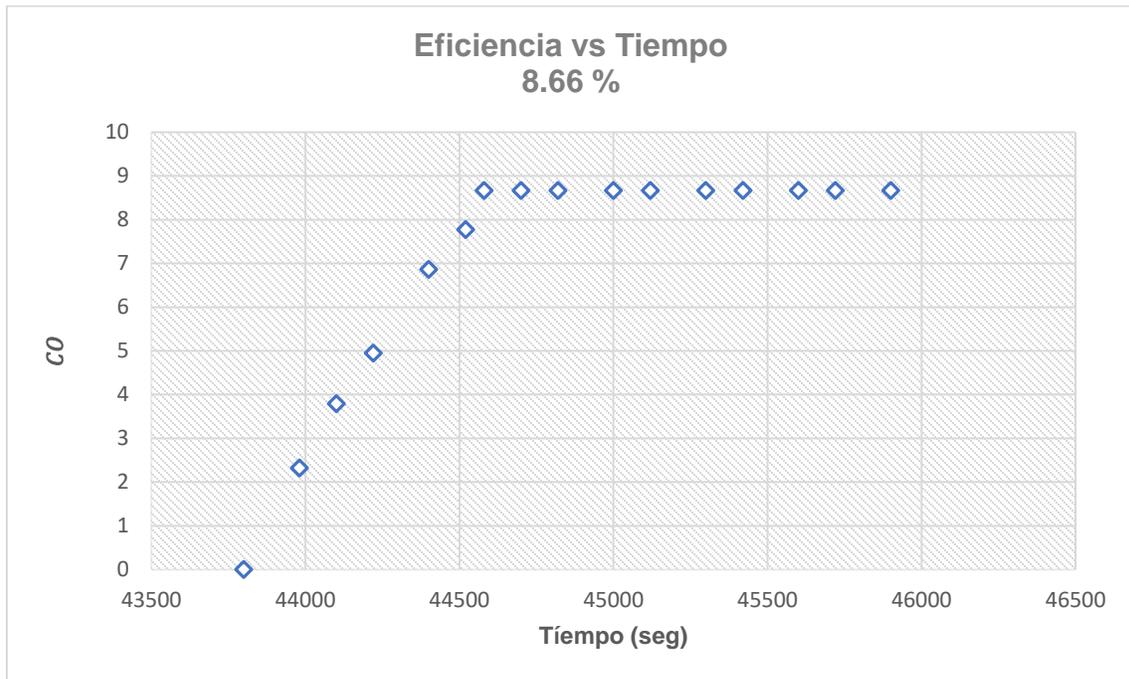


Figura 35 grafica de eficiencia 19.24 % con 2 perfiles.

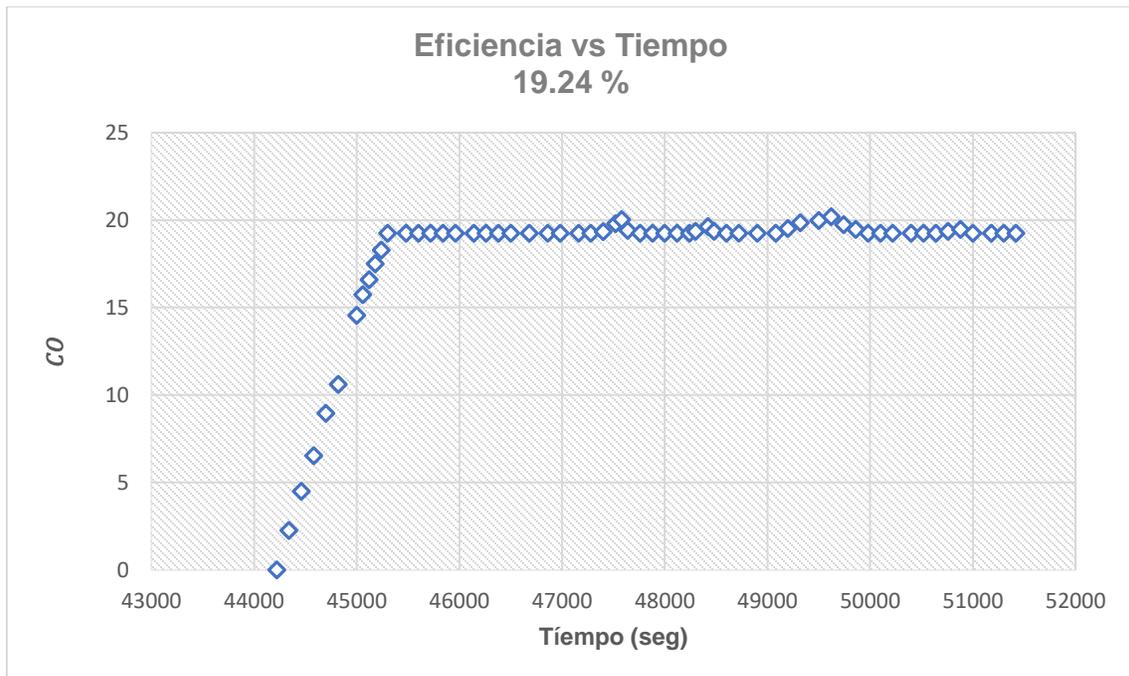


Tabla 29. Resultados de eficiencias con 3 perfiles.

RC= 18 Fecha: replica Nombre	Parámetro	08/02/2020	08/02/2020	15/02/2020	15/02/2020	07/09/2019	Unidades
Hora de inicio de Prueba	$H_i$	11:43:00 a. m.	13:27:00 p.m.	12:00:00 p.m.	12:34:00 p. m.	13:33:00 p.m.	Hora
Hora de Final de Prueba	$H_f$	12:38:00 p.m.	14:07:00 p.m.	12:30:00 p.m.	12:58:00 p.m	14:30:00 p.m	Hora
Tiempo de Prueba	$T_{ex}$	3300	2400	1800	1440	3420	Seg
Área Disponible	$A_d$	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	0.0172	$m^2$
Flujo masico de entrada	$\dot{m}_e$	0.0003636	0.0006375	0.0003611	0.0004409	0.0004298	$\frac{kg}{seg}$
Flujo masico de vapor	$\dot{m}_v$	0.0002424	0.0002208	0.0000833	0.0000937	0.0001374	$\frac{kg}{seg}$
Flujo masico de agua caliente	$\dot{m}_c$	0.0001212	0.0004166	0.0002777	0.0003472	0.0002923	$\frac{kg}{seg}$

Continuación. Tabla 29. Resultados de eficiencias con 3 perfiles.

<b>Energía Disponible</b>	$E_d$	<b>6073.04</b>	<b>8644.03</b>	<b>3310.1</b>	<b>2596.61</b>	<b>4968.46</b>	$\frac{J}{seg}$
<b>Energía útil</b>	$E_{util}$	629.43	681.6	301.77	348.6	444.76	$\frac{J}{seg}$
<b>Eficiencia</b>	$C_o$	9.64	12.68	10.99	7.44	11.17	N/a

Figura 36 grafica de eficiencia 11.7 % con 3 perfiles.

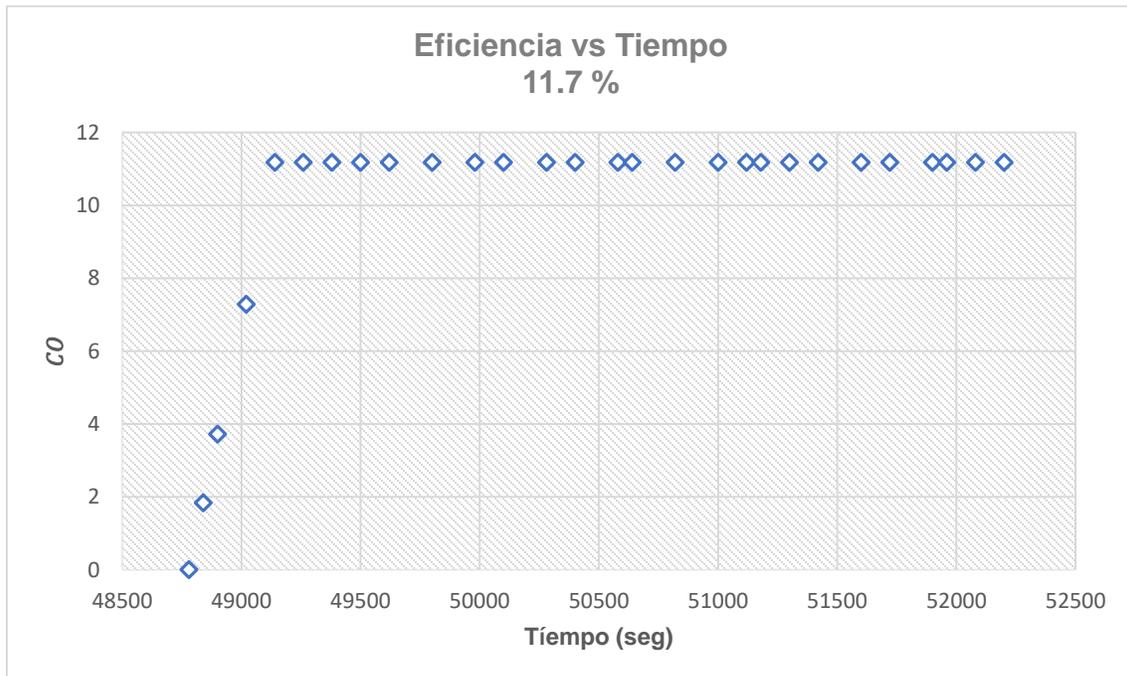
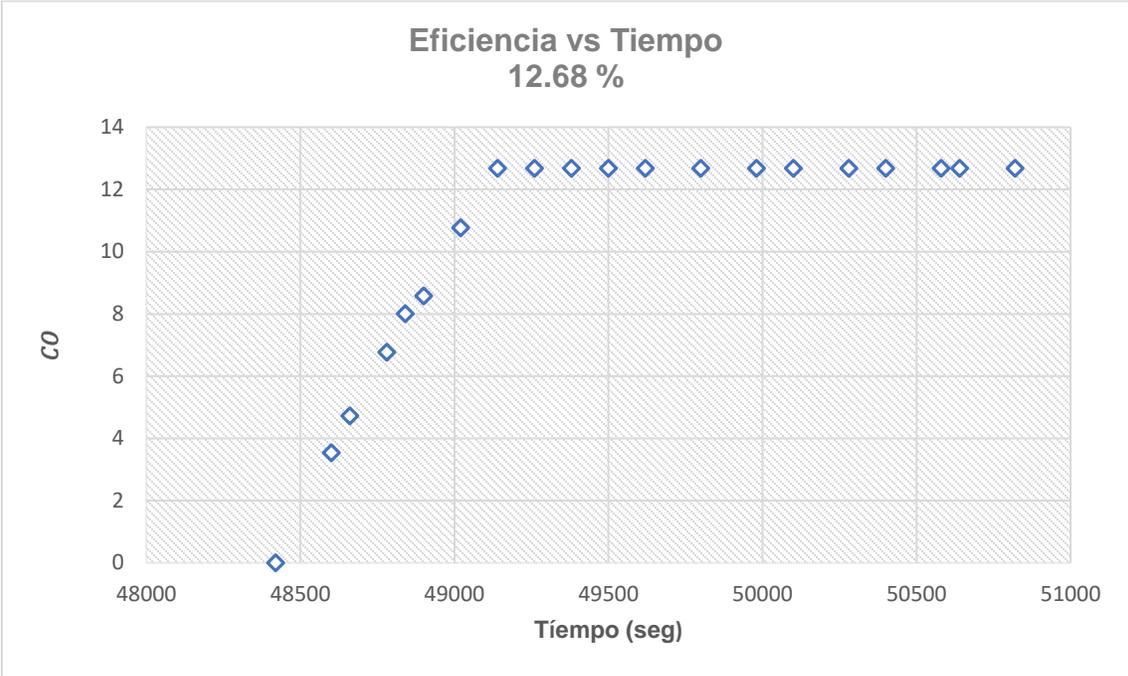


Figura 37 grafica de eficiencia 12.68 % con 3 perfiles.



## CONCLUSIONES

- La configuración de doble tubo del colector de canal parabólico ayudó a tener eficiencias térmicas aceptables en comparación con sistemas similares. Para este tipo de concentradores parabólicos es muy difícil obtener eficiencias mayores al 25 %.
- Con la recirculación de agua en el receptor, la cual fue precalentada en la región tubular y evaporada en la región anular, se logró evaporar agua para GDV.
- Al utilizar un equipo colector desmontable y de bajo costo, la generación directa de vapor se realiza de manera simple para aplicaciones de baja demanda.
- A niveles bajos de irradiación solar, la variación de la eficiencia con respecto a la insolación fue más significativa para alta temperatura de entrada
- Se observaron las mejores eficiencias con 2 espejos, ya que al realizar las pruebas con 3 espejos el peso de los mismos fue mayor, lo cual provocó que se desplazaran de su posición y se deformaran ligeramente por la acción de la gravedad (el peso de los espejos fu tal que se dio una deformación significativa en la parábola.
- Considerando del gran potencial de la energía solar en México para negocios locales donde se requiera vapor de agua para la operación, el sistema elaborado y estudiado en el presente trabajo es una buena opción en cuanto a simplicidad de uso, eficiencia y costo, con eficiencias térmicas aceptables.
- Evaluar materiales de construcción más rígidos y económicos será importante, para otros desarrollos ya que ayudaría a reducir ineficiencias ópticas por la parte del colector/concentrador.

## REFERENCIAS

- Akbarzadeh, S., Sadegh, M. (2108). Heat transfer enhancement in parabolic trough collectors. Elsevier, 92, 198-218.
- Almanza, R. (2003). Ingeniería de la energía solar II. *Instituto de ingeniería de la UNAM*, 636, 1-26.
- Almanza, R. (2008). Energía y cambio climático: energías renovables. *Instituto de ingeniería de la UNAM*, 52.
- Almanza, R. Muñoz, F. (2003). Ingeniería de la energía solar. Prisma color, México.
- Antonelli, M., Francesconi, M., Di Marco, P. (2016). Analysis of heat transfer in different CPC solar collectors: A CFD approach. Elsevier, 101, 479-489.
- Ayanegui, S. (1992). Manual de agua para usos industriales. México: Editorial Limusa.
- Bueno de las Heras, J. (2015). Termodinámica para ingeniería química. México: servicio de publicaciones.
- Cherres, L. (2011). *Control predictivo generalizado de una caldera de tubos de fuego*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Chiarappa, T. (2015). Performance of direct steam generator solar receiver: laboratory vs real plant. Elsevier, 69, 328-339.
- David, B., Ruxandra, V., Pieter, S. (2011). Innovation in concentrated solar power. Elsevier, 95, 2703-2725.
- Duffie, A., Beckman, A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Escoda, S. (2018). Blanco de las energías renovables. España: Universidad de Barcelona.

- Estrada, C., Arancibia, C. (2010). Energías renovables, Revista UNAM,8 (11).
- Estrada, V., Almanza, R. (2005). Irradiación global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana. *Instituto de ingeniería de la UNAM*, 646.
- García, J. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera piro tubular horizontal*. Tesis de licenciatura no publicada, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Giglio, A., Lanzinia, A., Leone, P., Margarita, M., Rodríguez, G., Zarza, E. (2017). Direct steam generation in parabolic-trough collectors: A review about the technology and a thermo-economic analysis of a hybrid system. Elsevier, 74, 453-473.
- Hachichaa, A., Rodríguez, I., Ghenaia, C. (2018). Thermo-hydraulic analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector for direct steam generation. Elsevier, 214, 152-165.
- Kaushika, N., Sumathy, K. (2003). Solar transparent insulation materials, Pergamon, 7, 317-351.
- Manahan, S. (2007) Introducción a la química ambiental. Reverte, España.
- Martínez, J. (2013). Calderas eficientes industriales. Recuperado de <http://www.madrid.org.html>
- Perez, D., Prieto, C. (2015) Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power. Elsevier, 80, 133-148.
- Powell, T. (1976) Acondicionamiento de agua para la industria. México: Editorial Lamusa Ravelli, S., Franchini, G., Perdichizzi, V. (2016). Modeling of Direct Steam Generation in Concentrating Solar Power Plants. Elsevier, 101, 464-471.

- Sánchez, A., Gonzales, F. (2011). Control de un generador de vapor didáctico. Tesis de licenciatura no publicada, IPN, Ciudad de México, México.
- Zahlera, C., Zimmermannb, E., Mahmoud, M., Al-Najamic, R. (2015). Solar process steam for pharmaceutical industry in Jordan. Elsevier, 70, 621-625.
- *Agencia Internacional de Energía (IRENA), 2016, p.10*  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MexicoEnergyOutlook.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (Mapas).
- Spencer, H. (1948). Industrial engineering chemical.
- Asociación Mexicana de Energía Solar (ASOLMEX), 2021, p.5
- Salgado, O. A. (2007), Colector de canal parabólico para calor de proceso, Título de Maestría, UNAM, Ciudad de México, México.
- Venegas, E. (2013), Diseño, Construcción y evaluación de un arreglo de concentradores de canal parabólico para calor de proceso, UNAM, Ciudad de México, México.

## APENDICE A

Relación de concentración

Tabla 30. Medidas de perfiles.

Perfiles	Distancia lineal entre los extremos de las láminas (cm)
1	47
2	139
3	179

Relación de concentración con 1 perfil.

$$RC = \frac{A_{\text{Apertura}}}{A_{\text{Recoleccion en el tubo}}} = \frac{(W)(L)}{2(\pi)(r)(L)} = \frac{(47 \text{ cm})}{2(\pi)(1.5 \text{ cm})} = 5$$

W = Amplitud lamina

L = longitud lamina

$$A_{\text{Apertura}} = (W)(L) = 47 \text{ cm}$$

$$r = \text{radio del absorbedor cilindrico} = 1.5 \text{ cm}$$

$$2(\pi)(r)(L) = \text{perimetro de la circunferencia del abosrobedor cilindrico} = 9.971 \text{ cm}$$

Relación de concentración con 2 perfiles.

$$RC = \frac{A_{\text{Apertura}}}{A_{\text{Recoleccion en el tubo}}} = \frac{(W)(L)}{2(\pi)(r)(L)} = \frac{(139 \text{ cm})}{2(\pi)(1.587 \text{ cm})} = 14$$

W = Amplitud lamina

L = longitudud lamina

$$A_{\text{Apertura}} = (W)(L) = 139 \text{ cm}$$

*r = radio del absorbedor cilindrico = 1.5 cm*

$$2(\pi)(r)(L) = \text{perimetro de la circunferencia del abosrobedor cilindrico} = 9.971\text{cm}$$

Relación de concentración con 3 perfiles.

$$RC = \frac{A_{\text{Apertura}}}{A_{\text{Recoleccion en el tubo}}} = \frac{(W)(L)}{2(\pi)(r)(L)} = \frac{(139 \text{ cm})}{2(\pi)(1.5\text{cm})} = 18$$

W = Amplitud lamina

L = longitudud lamina

$$A_{\text{Apertura}} = (W)(L) = 179 \text{ cm}$$

*r = radio del absorbedor cilindrico = 1.5 cm*

$$2(\pi)(r)(L) = \text{perimetro de la circunferencia del abosrobedor cilindrico} = 9.971\text{cm}$$

Datos del Colector

Tabla 31. Replica experimental Re con 3 perfiles.

<b>Nombre</b>	<b>23/08/2019</b>	<b>Unidades</b>
<b>Hora de Inicio de Prueba</b>	13:30:00 p. m.	
<b>Hora Final de Prueba</b>	13:57:00 p. m.	
<b>Área de receptor</b>	0.0179	$m^2$
<b>Área de colector</b>	0.00009971	$m^2$
<b>Diámetro Equivalente</b>	0.019	m
<b>Temperatura Ambiente</b>	303.15	°K
<b>Temperatura de Entrada</b>	303.15	°K
<b>Temperatura de Salida</b>	365.15	°K
<b>Volumen de entrada</b>	0.000604	$m^3$
<b>Densidad del agua</b>	995.6	$\frac{kg}{m^3}$
<b>Tiempo de Residencia</b>	1620	seg
<b>Viscosidad dinámica</b>	0.0007972	$\frac{kg}{m * seg}$
<b>Radiación</b>	594.8	$\frac{W}{m^2}$
<b>Velocidad de entrada</b>	0.003739239	$\frac{m}{seg}$
<b>Flujo masico de entrada</b>	0.000371199	$\frac{kg}{seg}$
<b>Numero de Reynolds</b>	88.72671584	N/A

Cálculo de número de Reynolds

Para el cálculo del número de Reynolds, se calcula el diámetro equivalente, para la sección transversal.

$A_t = \text{Área transversal}$

$P = \text{Perímetro Mojado}$

$D_{ext} = 38 \text{ mm} = 0.038 \text{ m}$

$D_{int} = 0.75 \text{ in} = 0.019 \text{ m}$

$$A_c = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2)$$

$$P = \pi (D_{ext} - D_{int})$$

$$D_{equi} = \frac{\frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{\pi (D_{ext} - D_{int})} = D_{ext} - D_{int} = 0.038 \text{ m} - 0.019 \text{ m} = 0.019 \text{ m}$$

Datos obtenidos de la tabla 28 replica experimental con 3 perfiles.

Velocidad de Entrada

Se calcula la velocidad de entrada

$$V_{ent} = \text{Volumen de entrada} = 0.000604 \text{ m}^3$$

$$A_{Colector} = \text{Area del Colector} = 0.00009971 \text{ m}^2$$

$$T_{exp} = \text{Tiempo de Experimentacion} = 1620 \text{ seg}$$

$$\begin{aligned}
 Velocidad_{ent} &= \frac{0.000604 \text{ m}^3}{1620 \text{ seg}} = 0.00000037283 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} = \frac{0.00000037283 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}}{0.00009971 \text{ m}^2} \\
 &= 0.003739 \frac{\text{m}}{\text{seg}}
 \end{aligned}$$

Los datos de viscosidad dinámica y densidad a la temperatura de entrada se obtuvieron de tablas disponibles en la literatura técnica (Spencer, 1948).

Tabla 32. Propiedades del agua.

<b>Temperatura</b>	<b>Viscosidad Dinámica</b>	<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>Densidad</b>
<b>°C</b>	(centiPoise)	(centistoke)	gramos/cm <sup>3</sup>
<b>19</b>	10,266	10,282	0,9984
<b>20</b>	10,016	10,034	0,9982
<b>21</b>	0,9775	0,9795	0,998
<b>22</b>	0,9544	0,9565	0,9978
<b>23</b>	0,9321	0,9344	0,9975
<b>24</b>	0,9107	0,9131	0,9973
<b>25</b>	0,89	0,8926	0,997
<b>26</b>	0,8701	0,8729	0,9968
<b>27</b>	0,8509	0,8539	0,9965
<b>28</b>	0,8324	0,8355	0,9962

Continuación. Tabla 32 propiedades del agua.

<b>29</b>	<b>0,8145</b>	<b>0,8178</b>	<b>0,9959</b>
<b>30</b>	0,7972	0,8007	0,9956
<b>31</b>	0,7805	0,7842	0,9953
<b>32</b>	0,7644	0,7682	0,995
<b>33</b>	0,7488	0,7528	0,9947
<b>34</b>	0,7337	0,7379	0,9944
<b>35</b>	0,7191	0,7234	0,994
<b>36</b>	0,705	0,7095	0,9937

Densidad del agua a 30°C

$$\rho = 0,9956 \frac{gr}{cm^3} = 995.6 \frac{kg}{m^3}$$

Viscosidad Dinámica a 30°C

$$\mu = 0,7972 \text{ centipoise} = 0.0007972 \frac{kg}{m * seg}$$

Numero de Reynolds

$$R_e = \frac{D_{equi} * \rho_{agua} * V_{ent}}{\mu}$$

$$R_e = \frac{0.019 \text{ m} * 995.6 \frac{kg}{m^3} * 0.003739 \frac{m}{seg}}{0.0007972 \frac{kg}{m * seg}} = 88.721$$

## Cálculo de Eficiencia

Para obtener el cálculo de eficiencia, se deben conocer los datos de la energía disponible que obtenemos del programa DEMO ORIGIN PRO.

Se realiza una integración de la radiación solar del día contra el tiempo de experimentación para conocer la energía disponible.

Tabla 33 eficiencia con 3 perfiles.

<b>Nombre</b>	<b>15/02/2020</b>	<b>Unidades</b>
<b>Hora de inicio de Prueba</b>	13:33:00 p.m.	Hora
<b>Hora de Final de Prueba</b>	14:30:00 p.m.	Hora
<b>Tiempo de Prueba</b>	3420	seg
<b>Área Disponible</b>	0.0172	$m^2$
<b>Flujo masico de entrada</b>	0.0004298	$\frac{kg}{seg}$
<b>Flujo masico de vapor</b>	0.0001374	$\frac{kg}{seg}$
<b>Flujo masico de agua caliente</b>	0.0002923	$\frac{kg}{seg}$
<b>Energía Disponible</b>	4968.46	$\frac{J}{seg}$
<b>Energía Útil</b>	444.76	$\frac{J}{seg}$
<b>Eficiencia</b>	11.17	n/a

## Datos de Experimentación

$$V_{ent} = \text{Volumen de entrada} = 1470 \text{ mililitros}$$

$$V_{cal} = \text{Volumen de agua caliente} = 1000 \text{ mililitros}$$

$$V_{eva} = \text{Volumen de agua evaporada} = 470 \text{ mililitros}$$

$$T_{exp} = \text{Tiempo de Experimentacion} = 3420 \text{ seg}$$

Caudal de entrada

Factor de conversión:

1 mililitros –  $1 \times 10^{-6}$  metros cúbicos.

$$Q = \text{Caudal de entrada} = \frac{1470 \text{ mililitros}}{3420 \text{ seg}} = 0.429824 \frac{\text{mililitros}}{\text{seg}} = 0.00000042982 \frac{m^3}{\text{seg}}$$

Caudal de agua caliente

$$\begin{aligned} Q_{cal} = \text{Caudal de agua caliente} &= \frac{1000 \text{ mililitros}}{3420 \text{ seg}} = 0.292397 \frac{\text{mililitros}}{\text{seg}} \\ &= 0.0000002924 \frac{m^3}{\text{seg}} \end{aligned}$$

Caudal de agua evaporada

$$\begin{aligned} Q_{eva} = \text{Caudal de agua evaporada} &= \frac{470 \text{ mililitros}}{3420 \text{ seg}} = 0.137423 \frac{\text{mililitros}}{\text{seg}} \\ &= 0.00000013743 \frac{m^3}{\text{seg}} \end{aligned}$$

Flujo másico de entrada

Densidad del agua a 28°C

$$\rho = 996.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_e = Q * \rho = 0.00000042982 \frac{m^3}{seg} * 996.2 \frac{kg}{m^3} = 0.000429825 \frac{kg}{seg}$$

Flujo masico de agua evaporada

$$\dot{m}_v = Q_{eva} * \rho = 0.000000137423 \frac{m^3}{seg} * 996.2 \frac{kg}{m^3} = 0.000137423 \frac{kg}{seg}$$

Se obtiene el Cp a 92° C de tablas de vapor de agua.

$$C_p = 4450 \frac{J}{kg * k}$$

Landa de vapor saturado de tablas de vapor de agua a 92°C.

$$\lambda_{vap sat} = 385,400 \frac{J}{kg}$$

Landa de líquido saturado de tablas de vapor de agua a 92°C.

$$\lambda_{liq sat} = 2,663,400 \frac{J}{kg}$$

## Energía Útil

$$T_i = \text{Temperatura inicial} = 301.15 \text{ K}$$

$$T_f = \text{Temperatura Final} = 365.15 \text{ K}$$

$$E_{util} = \dot{m}_e * c_p * (T_f - T_i) + \dot{m}_v * (\lambda_{liq sat} - (\lambda_{vap sat}))$$

$$E_{util} = 0.000429825 \frac{kg}{seg} * 4450 \frac{J}{kg * k} * (365.15 \text{ K} - 301.15 \text{ K}) + 0.000137423 \frac{kg}{seg} * \left( 2,663,400 \frac{J}{kg} - 385,400 \frac{J}{kg} \right) = 435.4637 \frac{J}{seg}$$

## Área Disponible de Colector

$$A_{dis} = 0.0172 \text{ m}^2$$

Para la energía disponible se multiplica el valor de radiación del resultado de la integral con el tiempo de experimentación por el Área del colector para obtener  $\frac{J}{seg}$ .

## Valor de radiación

$$E_{Disp} = 288864 \text{ Gg} * 0.0172 \text{ m}^2 = 4968.4608 \frac{J}{seg}$$

Eficiencia

$$C_o = \frac{E_{Disponible}}{E_{Útil}}$$

$$C_o = \frac{4968.4608 \frac{J}{seg}}{435.4637 \frac{J}{seg}} = 11.40 \%$$

