

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA CONSIDERANDO MEDIOS
CONVECTIVOS PARA COLECTORES SOLARES PARABÓLICOS.

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

PRESENTA

NANCY ISAMAR ORTEGA MOJICA

DIRECTORES DE TESIS

DR.JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ

DRA.SUSANA SILVA MARTÍNEZ

SINODALES

DR.ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS

DR.ARMANDO HUICOCHA RODRÍGUEZ

DRA.ARIANNA PARRALES BAHENA

CUERNAVACA, MORELOS

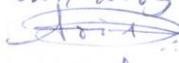
MARZO, 2018

Cuernavaca, Morelos, a 26 de febrero de 2018.

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
COORDINADOR DE POSGRADO EN
SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA CONSIDERANDO MEDIOS CONVECTIVOS PARA COLECTORES SOLARES PARABÓLICOS" que presenta la alumna NANCY ISAMAR ORTEGA MOJICA, para obtener el título de MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS	Aprobada	
DRA. ARIANNA PARRALES BAHENA	Aprobada	
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ	Aprobada	
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ	APROBADA	
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ	Aprobada	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

DSJ*MLGE/aego.

Resumen

Este trabajo lleva a cabo un estudio experimental para concentrar, almacenar, calcular y analizar la transferencia de energía en tubos concéntricos con medios convectivos sobre una base parabólica solar. El sistema construido como un colector solar parabólico compuesto CPC con arreglos de los tubos de cobre-vidrio y cobre-cobre para determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección de las diferentes configuraciones agua-aire y agua-agua. Para el uso de cobre-vidrio se obtuvo un coeficiente máximo de $h_{conv}=7.75 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el arreglo de agua-aire. Para el segundo arreglo agua-agua, con tubos de cobre-vidrio se obtuvo un coeficiente de transferencia máximo de $h_{conv}=4.75 \times 10^2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Así también se determinó con fluidos de agua-aire utilizando tubos cobre-cobre $h_{conv}=9.33 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $h_{conv}=6.12 \times 10^2 \text{ W/m}^2\text{K}$ con arreglo agua-agua. Por lo tanto la selección de materiales es un punto crítico en el desarrollo de almacenamiento y transferencia de energía.

Para la segunda parte experimental se diseñó en una configuración convencional de vidrio-cobre y se utilizó Cloruro de Sodio acuoso como fluido de trabajo a diferentes potenciales de concentración, estos fueron a (3.09, 1.54 y 0.30 mol). Sus calores obtenidos fueron mayores con una concentración menor $Q=1121 \text{ J}$ para 0.30 mol, la menor ganancia de calor fue con agua $Q=755.2 \text{ J}$

En la tercera parte experimental de este trabajo, se analizó en un colector solar de canal parabólico CPC, los cuatro flujos fueron (0.7, 1, 2, 3 L/min) en un sistema con tapa, con fluido de trabajo de aire y agua en la interface del absorbedor y la cubierta. Los resultados demuestran que se obtuvo una mayor energía con flujo de 3 L/min $Q_{abs}=14000 \text{ J}$.

Abstract

This work carries out an experimental study to concentrate, store and analyse the transference of energy in concentric pipes with convective ambient on a solar parabolic base. The system constructed as a parabolic collector CPC, using arrays with copper-glass pipes and copper-copper pipes to determine the coefficients of heat transference by convection of the different water-air and water-water configurations.

For the use of copper-glass, the maximum coefficient obtained was $h_{\text{conv}}=7.75 \text{ W/m}^2\text{K}$ with water-air array. The second array water-water a maximum coefficient obtained was $h_{\text{conv}}=4.75 \times 10^2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Also, it was determined with water-air fluids using copper-copper $h_{\text{conv}}=9.33 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $h_{\text{conv}}=6.13 \times 10^2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Therefore, the selection of materials is a critical point in the development of storage and energy transference. For the second experimental part it was designed like conventional prototype copper-glass it was use with sodium chloride as working fluid at different concentration potentials.

These were (3.09, 1.54 and 0.30 mol) the heats obtained were higher with lower concentration $Q= 1121 \text{ J}$ for 0.30 mol and the lowest heat gain was using water $Q=755.2\text{J}$.

In the third experimental part, it was analyzed in a parabolic trough solar CPC. The flows were (0.7, 1, 2, 3 L/min) in a system with lid, used as a working fluid at the absorber and water an interface cover. The results show that a higher energy was with flow of 3 L/min $Q=1400 \text{ J}$

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que formaron parte en este trayecto de mi vida, a pesar de que ya no están presentes con todo mi amor y cariño.

Al centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por sus servicios académicos que me permitieron realizar mi Posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-SENER) por el apoyo económico brindado.

Le agradezco con mucho cariño, al Dr. José Alfredo Hernández Pérez, por todo su tiempo, enseñanzas académicas y apoyo en los momentos de dificultad.

Dra. Susana Silva por sus conocimientos enseñados, consejos, motivación para todos los aspectos de la vida, por ser una persona tan comprensiva y humana.

A todos mis asesores que me brindaron todo su apoyo y conocimiento en mi formación como Maestro

DEDICATORIAS

***Gracias a Dios por darme una segunda oportunidad
Y aprender a ser feliz en las tribulaciones de la vida.***

Con todo mi amor a mi familia por estar conmigo en la salud y en la enfermedad

A mi madre por todo su amor y cariño en toda mi vida.

Mi padre por el ejemplo de luchar.

Mi hermana Stephanie con su apoyo fraternal e incondicional.

Mi hermana Sharon por su carisma y apoyo fraternal.

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	1
1.1 Justificación	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. MARCO TEORICO	4
2.1 Calentamiento global en México	4
2.2 Energía solar en México	5
2.3 Colector solar de Canal Parabólico	6
2.4 Componentes del CPC	7
2.5 Propiedades de los materiales para CPC	8
2.6 Orbita de la tierra alrededor del sol.....	9
2.7 ¿Qué es la radiación solar?, y tipos de radiación solar.....	10
2.8 Transferencia de calor por radiación.....	11
2.9 Resistencias térmicas en CPC a la radiación	12
2.10 Clasificación de concentradores	13
2.11 Colector Parabólico Compuesto	15
2.12 Diseño geométrico.....	16
2.14 Uso de fluidos de transferencia de calor en Colectores Solares Parabólicos.....	19
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 Diseño y construcción del colector solar parabólico compuesto	21
3.2 Primera parte experimental.....	21
3.3 Fluidos de trabajo para CPC.....	22
3.4 Materiales propuestos para cubierta del CPC.....	23
3.5 Dimensionamiento de CPC.....	24

3.6 Calibración para el adquirente de datos.....	26
3.7 Montaje de CPC en laboratorio.....	26
3.8 Ubicación de termopares en tubo concéntrico.....	27
3.9 Montaje de la experimentación para primer sistema.....	28
3.10 Cálculos para dimensionamiento de CPC.	29
3.11 Ecuaciones de energía para CPC.....	32
3.12 Análisis térmico de un colector solar parabólico compuesto.....	32
3.13 Análisis de coeficientes convectivos.....	34
3.14 Evaluación de coeficientes en análisis térmico solar	35
3.15 Segunda parte experimental.....	38
3.16 Análisis estequiométrico	39
3.17 Metodología para la tercera parte experimental.....	40
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 Resultados de primer diseño experimental.....	42
4.1.1 Análisis de resultados utilizando diferentes fluidos de trabajo con recubrimientos de vidrio y cobre.....	42
4.1.2. Comportamiento de temperaturas en diferentes días.....	44
4.2 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con aire	45
4.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta al ambiente con aire	47
4.2.2 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con agua.....	48
4.2.3 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con agua.....	49
4.3 Condiciones climatológicas para primer sistema	50
4.4 Cálculo de energía útil	51
4.4.1 Comportamiento de energía útil en diferentes días	53
4.5 Coeficiente radiativo para primer sistema.....	54
4.6 Análisis térmico para cálculo de transferencia neta de calor	55

4.7 Análisis térmico en estado estacionario.....	56
4.8 Resultados de transferencia neta de calor con vidrio y cobre.....	57
4.8.1 Análisis de resultados experimentales primer sistema	59
4.9 Resultados de segundo diseño experimental	60
4.10 Resultados de transferencia neta de calor Cloruro de Sodio	61
4.11 Análisis de las temperaturas obtenidas en el CCP en ambos sistemas usando agua.....	63
ÁPENDICE A	73
ÁPENDICE B	75
ÁPENDICE C	76
ANEXO1	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Radiación solar en México (Servicio Meteorológico Nacional 2017).....	5
Figura 2.2. Colector solar de canal parabólico, (Energía Solar térmica de alta temperatura, 2016)	6
Figura 2.3. (A)Colector solar de canal parabólico a nivel industrial figura modificada (2018) Energía solar termoeléctrica, (B) Tubo de CPC	7
Figura 2.4. Variación de la posición solar según la estación del año. (Modelo para representar la trayectoria de un globo terrestre, 2017)	9
Figura 2.5. Componentes de la radiación solar terrestre (Tecnoambiental solar, 2017).....	11
Figura 2.6. Energía radiante que choca sobre una superficie (Cengel, 2007).....	12
Figura 2.7. Red de resistencia térmica para la sección transversal del tubo receptor para un colector solar de canal parabólico. (Kalogirou A., 2012)....	13
Figura 2.8. Diseño transversal esquemático de la construcción del colector tipo CPC. (Malato <i>et al</i> 2004).....	15
Figura 2.9. Partes principales como son la involuta, las parábolas y el receptor cilíndrico.....	18
Figura 2.10. A) Reflexión directa, B) Reflexión difusa Blesa y Sánchez. (2001d)	18
Figura 2.11. Características de un fluido de transferencia de calor.....	19
Figura 3.1. Primer prototipo de CPC con diferentes configuraciones.....	22
Figura 3.2. Diagrama de fluidos de trabajo en la interface del tubo CPC, (A) Fluido de aire, (B) Fluido de agua	22
Figura 3.3. Calibración de adquisitor de datos	26

Figura 3.4. (A) Colocación de termopares en tubo colector, (B) Termopar en la parte exterior del tubo, (C) Montaje de CPC en laboratorio.....	27
Figura 3.5. Ubicación de termopares en tubo concéntrico	28
Figura 3.6. Montaje final de sistema.....	29
Figura 3.7. Valores estándar de coeficiente convectivo	35
Figura 3.8. Segundo prototipo de CPC con diferentes configuraciones.....	38
Figura 3.9. A) NaCl sólido, B) Cloruro de Sodio acuoso aforado	39
Figura 3.10. A) Fluido de agua en interface CPC, B) Montaje final CPC.....	41
Figura 4.1. Perfil de temperatura para las configuraciones del primer sistema	42
Figura 4.2. Comportamiento de temperatura para las pruebas (A) 26 Abr 17, (B) 28 Abr 17, (C) 3 May 17, (D)16 May 17 , (E) 18 May 17, (F) 29 May 17.....	44
Figura 4.3. Coeficiente convectivo interno de vidrio y cobre con aire.....	46
Figura 4.4. Coeficiente convectivo externo del vidrio y cobre con aire.....	47
Figura 4.5. Coeficiente convectivo interno de vidrio y cobre con agua.....	48
Figura 4.6. Coeficiente convectivo externo del vidrio y cobre, utilizando agua como fluido de trabajo.....	49
Figura 4.7. (A) Radiación solar de día de la mediación, (B) Condiciones climatológicas.....	50
Figura 4.8. Potencia útil de primer sistema	51
Figura 4.9. Comportamiento de potencia útil para las pruebas (A) 26 Abr 17, (B) 28 Abr 17, (C) 3 May 17, (D)16 may 17 , (E) 18 may 17, (F) 29 May 17.....	54
Figura 4.10. Coeficiente radiativo para primer sistema	53

Figura 4.11. Modelo del colector de concentrador de imagen (Kalogirou S., 2004).....	54
Figura 4.12. Calor entregado por los sistemas de vidrio y cobre.....	56
Figura 4.13. Perfil de temperaturas para segundo sistema	59
Figura 4.14. Energía de sistema con NaCl a diferentes concentraciones....	61
Figura 4.15. Energía absorbida a 0.7 y 1 L/min con aire y agua	63
Figura 4.16. Energía absorbida a 2 y 3 L/min con aire y agua	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros para CPC.....	8
Tabla 2.2. Clasificación de colectores y sus concentraciones	14
Tabla 3.1. Propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo	23
Tabla 3.2. Propiedades de conductividad térmica de materiales sólidos.....	24
Tabla 3.3. Dimensiones de CPC	25
Tabla 3.4. Peso de NaCl a diferentes solubilidades	40
Tabla 4.1. Coeficientes convectivos máximos para primer sistema.....	50
Tabla 4.2. Resumen de potencia útil máxima	52
Tabla 4.3. Valores de energía del sistema con agua y aire	58
Tabla 4.4. Valores experimentales	59

NOMENCLATURA

Q_{abs}	Energía absorbida (J)
$hrad_{r-c}$	Coeficiente radiactivo de receptor a la cubierta (W/m ² K)
hr_{c-a}	Coeficiente lineal de transferencia de calor por radiación (W/m ² K)
θ_a	Semiángulo de aceptación
T_∞	Temperatura de fluido lejos de la pared (°C)
ΔT	Diferencial de temperatura (°C)
A	Área (m ²)
Aa	Ángulo de apertura (grados)
Ac	Área de la superficie externa de la cubierta de vidrio del receptor (m ²)
Ar	Área de la superficie externa (m ²)
C	Razón de concentración (adimensional)
C_p	Calor específico a presión constante (kJ/kg K)
D	Diámetro (m)
Di	Diámetro interno (m ²)
Do	Diámetro externo (m ²)
G	Aceleración debida a la gravedad (m/s ²)
Gr	Numero de Grashof (Adimensional)
h	Coeficiente de transferencia de calor (W/m ² K)
hw	Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² K)
I_s	Irradiación solar (W/m ²)
K	Conductividad térmica (W/m K)

<i>K_{eff}</i>	Conductividad térmica efectiva (W/mK)
L	Longitud del tubo (m)
<i>L_c</i>	Longitud característica (m ²)
L_t	Longitud del área de transferencia (m)
<i>ṁ</i>	Flujo másico (kg/s)
m	Masa (kg)
<i>n</i>	Número de moles
Un	Número de Nusselt (adimensional)
<i>P_m</i>	Peso molecular (g/mol)
Pr	Número de Prandtl (adimensional)
<i>Q̇</i>	Flujo de calor (W)
Q_u	Potencia útil (W)
Ra	Número de Rayleigh (adimensional)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
Sr	Radiación solar incidente absorbida por unidad de área (W/m ²)
T	Temperatura (°C, K)
<i>T_{amb}</i>	Temperatura ambiente K
<i>T_{ext}</i>	Temperatura externa K
T_i	Temperatura media en la superficie de la placa colectora (K)
U_L	Coeficiente global de pérdidas de calor (W/m ² K)
α	Absorbancia del tubo receptor (adimensional)
α	Viscosidad cinemática del fluido
α	Absortividad
θ	Ángulo de inclinación (grados)

μ	Viscosidad dinámica (Pa.s)
ρ	Densidad (kg/m^3)
ρ_0	Superficie reflectiva (adimensional)
τ	Transmitancia de la cubierta de vidrio (adimensional)
φ	Reflectividad
β	Coefficiente de expansión volumétrica
ε	Emisividad
τ	Transmisividad

SUBÍNDICES

amb	Ambiente
atm	Atmósfera
sky	Aire
Keff	Effectiva
int	Interior
Aa	Área de apertura del colector
s	Superficie de transferencia
t	Sección transversal
r	Recibidor
c	Cubierta
conv	Convectivo
rad	Radiativo

Capítulo 1

1. ANTECEDENTES

La energía solar proviene de una de las consideradas fuentes inagotables de energía que es el sol. En los últimos años, con base al tipo de beneficios que nos brindan los rayos que llegan hasta la tierra se ha incrementado el uso de energías renovables para mejora continua de sistemas sin usar el uso excesivo de petróleo y gas. Las condiciones de sobre oferta del crudo y las presiones internacionales por combatir el cambio climático han abierto el área de estudio a nuevas alternativas como las energías renovables.

Hoy en día podemos captar la energía del sol mediante colectores solares que producen energía térmica, esta energía es libre, limpia e inagotable, por eso decimos que es renovable. Aunque la energía proporcionada por el Sol es abundante en cuanto a espacio irradiado, en muchas zonas de nuestro planeta, sin embargo, nos llega al nivel de la tierra en muy baja densidad (en México la irradiación solar promedio es del orden de $E_s \sim 850 \text{ W/m}^2$).

El uso de concentradores solares nos brinda la oportunidad de aplicar la energía solar en diversas tecnologías, y como ejemplos se tienen: la cocción de alimentos, el calentamiento de agua para uso en el hogar, la generación de vapor que luego ser usado en generación de energía eléctrica, entre otras. Por esta razón viene el entendimiento del uso de colectores solares de canal parabólico.

1.1 Justificación

El cambio climático es uno de los retos más importantes a nivel mundial que enfrenta la sociedad. El aprovechamiento de la energía solar en procesos de almacenamiento de energía solar permite disminuir los costos asociados con el calentamiento de fluidos, con un mínimo impacto ambiental. En el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) se emplea un trabajo de investigación con diferentes fluidos de trabajo como el agua, aire y sales de cloruro de sodio que tienen la capacidad de ser empleados para almacenar energía calorífica, debido a que son estables, no tóxicos, con altos valores de conductividad térmica para el uso eficiente de transferencia de calor. Estos fluidos pueden ser empleados en Colectores Parabólico Compuesto los cuales concentran la energía solar misma que podrá ser almacenada.

HIPÓTESIS

Se logró evaluar la potencia útil de diferentes fluidos de trabajo, con diferentes configuraciones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la eficiencia energética considerando diferentes medios convectivos para un colector solar de canal parabólico afín de incrementar su transferencia de calor

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar e instalar un Colector solar Parabólico Compuesto utilizando cubiertas de cobre y vidrio, analizándolos con diferentes fluidos de trabajo que presentan altos valores de conductividad térmica.

Evaluar los coeficientes de transferencia de calor por convección, energía emitida por el sistema, utilizando como fluidos de trabajo agua, aire con arreglos de tubos concéntricos de cobre-vidrio y cobre-cobre.

Analizar la energía absorbida del Cloruro de Sodio acuoso a diferentes concentraciones en configuraciones de cobre-vidrio y cobre-cobre.

Capítulo 2

2. MARCO TEORICO

2.1 Calentamiento global en México

El principal problema de la humanidad y más importante es la existencia del calentamiento global con una concentración desastrosa. Las estrategias aún no han sido suficientes, debido que la Tierra ha perdido 400 ppm de acuerdo con el manual Loa Observatory en Hawái que monitorea el CO₂ atmosférico desde 1958 Tinseng *et al.* (2014).

Estamos donde existe prioridad en dirección de gas, reservas fósiles que han incrementado el enfoque a largo plazo para enfrentar el cambio climático y el aumento de demanda de energía.

En las últimas décadas, las emisiones de GEI (Gas de Efecto Invernadero) en México han aumentado rápidamente y, hasta 2011, creció en tándem con el crecimiento económico. A partir de 1990, las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía crecieron en dos tercios a 431 millones de toneladas (Mt) en 2014. Los combustibles fósiles representan el 90% de los suministro de energía primaria, una gran proporción en comparación internacional. Emisiones aumentadas la mayoría en el transporte (ahora el emisor más grande) y la generación de electricidad. IEA (2017).

2.2 Energía solar en México

De acuerdo con la Figura 2.1 un 70% del territorio nacional presenta una irradiación superior a los 4.5 kWh/m² lo que lo convierte en un país muy soleado. La zona norte del país una irradiación mayor aproximada a los 5.5 kWh/ m² y una irradiación mínima de 4.8 kWh/ m². México es uno de los 5 países en el mundo con mayor atractivo para invertir en energía solar. La energía solar se está acelerando a nivel industrial. Mientras que el despliegue de los sistemas solares de calentamiento de agua está aumentando sistemas de calefacción urbana y aplicaciones industriales con apoyo de energía solar.

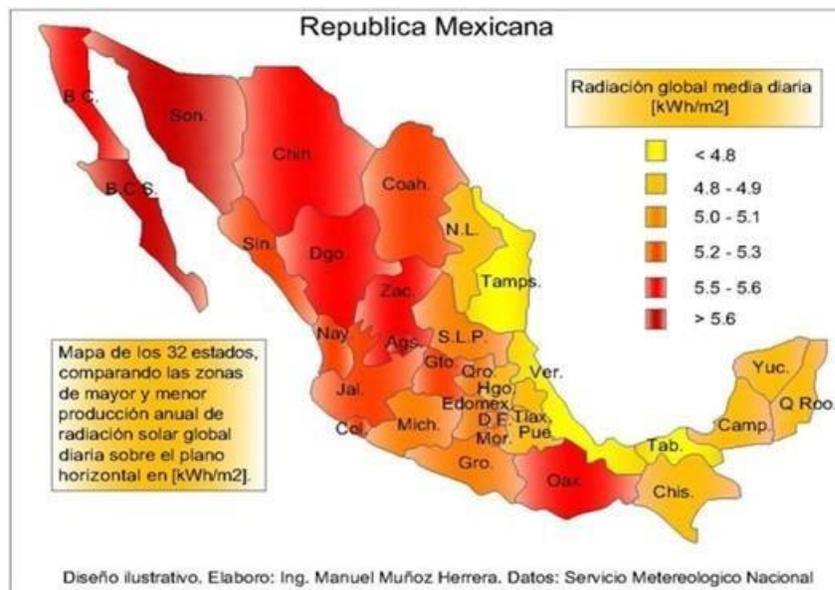


Figura 2.1. Radiación solar en México (Servicio Meteorológico Nacional 2017).

2.3 Colector solar de Canal Parabólico

Un calentador solar es un aparato que se utiliza para calentar alguna sustancia, como puede ser agua, glicol, salmuera, aceite entre otras; con la energía proveniente del sol. Un buen calentador solar de agua puede durar funcionando hasta 15 ó 20 años. La energía termal del sol puede ser utilizada para calentar agua a temperaturas inferiores a los 100°C o para la calefacción de ambientes. Se recomienda limpiar el colector cada 4 o 6 meses para aumentar su eficiencia y vida útil. Debido a que la inclinación terrestre modifica el ángulo de la incidencia de los rayos del sol a lo largo del año, es conveniente ajustar la inclinación del colector. Se recomienda tener un margen de +15° y -15° con respecto al ángulo de los rayos del sol en el equinoccio. Estos están compuestos por un tubo absorbedor que almacena fluidos de trabajo ya sean (agua, aire, aceite) como se puede observar en la Figura 2.2. Este tipo de plantas son las más prometedoras desde el punto de vista comercial. Usan espejos en forma de cilindros parabólicos por cuyo eje discurre una tubería donde se concentran los rayos del sol. La tubería contiene un fluido que se calienta y genera vapor que mueve una turbina (Fernández García, 2010)



Figura 2.2. Colector solar de canal parabólico, (Energía Solar térmica de alta temperatura, 2016).

2.4 Componentes del CPC

La Figura 2.3 (A) describe un colector solar de canal parabólico a nivel industrial donde la superficie reflectora concentra sobre el receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. A grandes rasgos es un espejo curvo que forma una parábola que es llevada a cabo de un tubo de cobre con una cubierta de vidrio externa. En la Figura 2.3 (B) se pueden ver los elementos fundamentales del conjunto del colector pues el rendimiento global del colector depende de la calidad termodinámica del absorbente que puede constar de un solo tubo o dos tubos concéntricos.

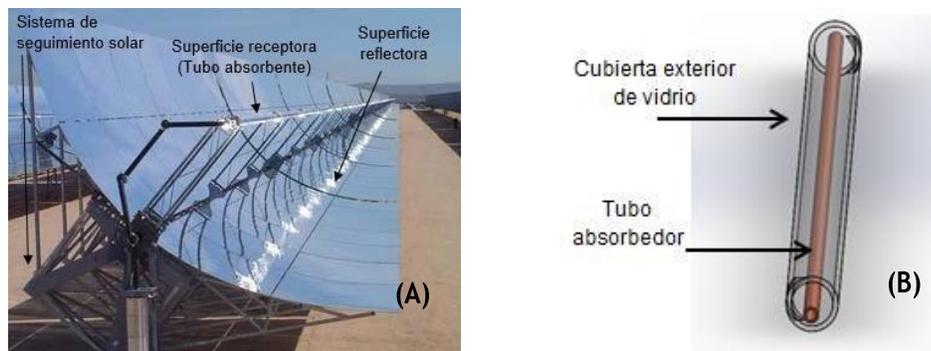


Figura 2.3. (A) Colector solar de canal parabólico a nivel industrial figura modificada (2018) Energía solar termoeléctrica, (B) Tubo de CPC.

En un colector solar todos los componentes juegan un papel importante para en funcionamiento eficiente de este. Uno de ellos es el receptor que consiste en un tubo metálico que lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorptividad (94%) y una baja emisividad. Se requiere que exista vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico y el cristal.

En la parte externa del tubo absorbedor se encuentra la cubierta de cristal que rodea el interior del tubo metálico este protege el recubrimiento metálico

de las incidencias meteorológicas y reduce las pérdidas térmicas por convección en el tubo absorbedor.

Un reflector cilindro parabólico refleja y proyecta la radiación solar de forma concentrada sobre el tubo absorbedor situado en la línea focal del reflector. Para llevar a cabo la reflexión, se utilizan películas de plata o aluminio sobre un soporte que da suficiente rigidez.

2.5 Propiedades de los materiales para CPC

Bellos y Torres (2016) realizaron una simulación de rendimiento óptico y térmico de un colector parabólico compuesto CPC con tubo de vacío. Las propiedades de cada material son los principales parámetros que se muestran en la Tabla 2.1, además los parámetros de radiación solar son muy importantes para cualquier análisis con uso solar la selección de materiales se presenta a continuación.

Tabla 2.1. Parámetros para CPC

PARÁMETRO	SIMBOLOGÍA	CANTIDAD
Conductividad térmica tubo receptor	K	400 W/m ² K
Absorbancia de receptor	α	0.906 [-]
Transmitancia cubierta de vidrio	τ	0.95 [-]
Factor Forma	γ	1 [-]
Reflectancia de la Superficie parabólica	$\rho\sigma$	0.96 [-]
Emisividad del receptor	ϵ_r	0.1
Emisividad de la cubierta	ϵ_c	0.88

2.6 Órbita de la tierra alrededor del sol

El motivo principal de que tengamos estaciones en nuestro planeta no tiene absolutamente nada que ver con la distancia al sol, sino que la culpa la tiene la conservación del momento angular. Esta magnitud física viene a ser la “cantidad de movimiento de rotación” de un cuerpo y cuando se conserva en el tiempo (como es el caso) tenemos que tanto la velocidad de rotación de la Tierra como el eje de giro se mantienen constantes.

El eje de rotación de la tierra se encuentra desviado con respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica (plano en el que orbitan los planetas). Esta desviación o inclinación es de unos 23.5° y provoca que exista una diferente duración del día y la noche dependiendo de las estaciones. Si el eje de giro fuera perpendicular a la eclíptica los días y las noches durarían exactamente lo mismo todos los días del año y no habría estaciones. Gracias a la inclinación de 23.5° tenemos que un hemisferio recibe mayor cantidad de luminosidad que otro invirtiéndose la situación cada seis meses debido a la traslación de la tierra alrededor del sol (ver Figura 2.4).

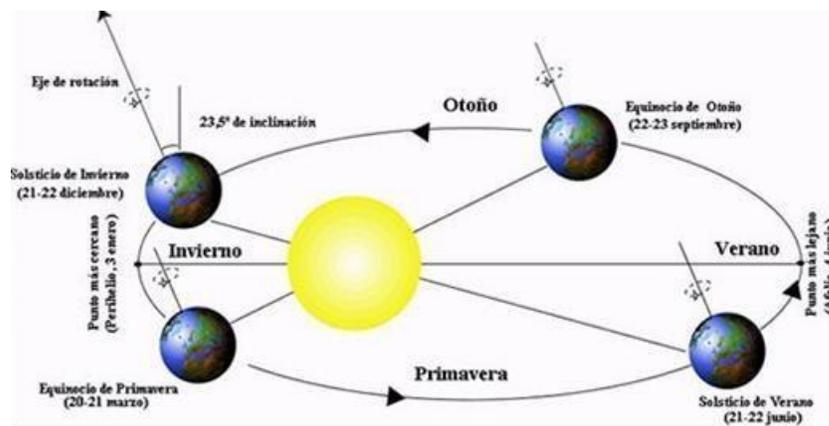


Figura 2.4. Variación de la posición solar según la estación del año. (Modelo para representar la trayectoria de un globo terrestre, 2017).

2.7 ¿Qué es la radiación solar?, y tipos de radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación es absorbida por la atmosfera pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmosfera fundamentalmente por el ozono.

La figura 2.5 muestra la función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre se pueden distinguir estos tipos de radiación.

- a) Radiación directa Es la radiación que incide directamente desde el sol sobre una superficie.
- b) Radiación difusa es la recibida por una superficie después de que su dirección ha sido cambiada por la dispersión de la atmosfera.
- c) Radiación Global se define como la suma de la radiación directa y la difusa que incide sobre una superficie, en ocasiones se usa para indicar la integral sobre todas las longitudes de onda del espectro solar.
- d) Irradiancia es la relación a la cual la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área y tiempo

- e) Irradiación se le llama así a la relación entre la energía que llega a una superficie y el área de esta. Se puede obtener de la integración de la irradiación sobre un tiempo específico generalmente sobre una hora o día.

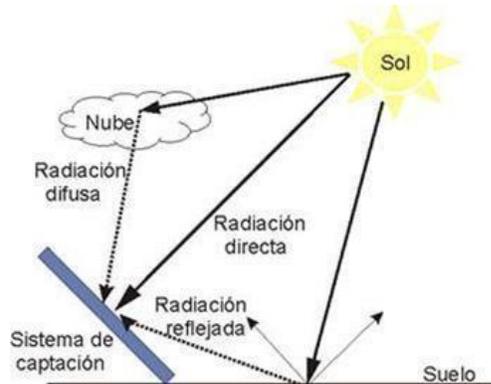


Figura 2.5. Componentes de la radiación solar terrestre (Tecnoambiental solar, 2017).

2.8 Transferencia de calor por radiación

La transmisión de calor por radiación se caracteriza porque la energía se transporta en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan a la velocidad de la luz. El transporte de energía por radiación puede verificarse entre superficies separadas por el vacío. La Figura 2.6 describe los rayos del sol transmiten energía a la Tierra enteramente por radiación. Un cuerpo negro se define por aquel que emite y absorbe la máxima cantidad de energía a una temperatura determinada.

Reflectividad ρ : Es la fracción de calor incidente sobre el cuerpo que refleja.

Absortividad α : Es la fracción que se absorbe.

Trasmitividad τ : Es la fracción de energía incidente transmitida a través del cuerpo.

Emisividad ε : Es la efectividad del cuerpo como un radiador térmico a una temperatura. Es la relación de la emisión de calor a una temperatura dada a la emisión de calor desde un cuerpo negro a la misma temperatura.

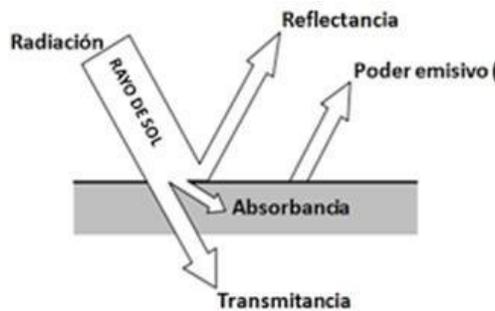


Figura 2.6. Energía radiante que choca sobre una superficie (Cengel,2007).

2.9 Resistencias térmicas en CPC a la radiación

La Figura 2.7 muestra el modelo de resistencia térmica obtenido. El modelo asume que todas las temperaturas, flujos de calor y propiedades termodinámicas son uniformes alrededor de la circunferencia del receptor. Esto puede presentar controversia ya que la radiación no es uniforme y la parte inferior recibe un flujo solar mucho mayor que la parte superior debido a la radiación reflejada por la parábola compuesta.

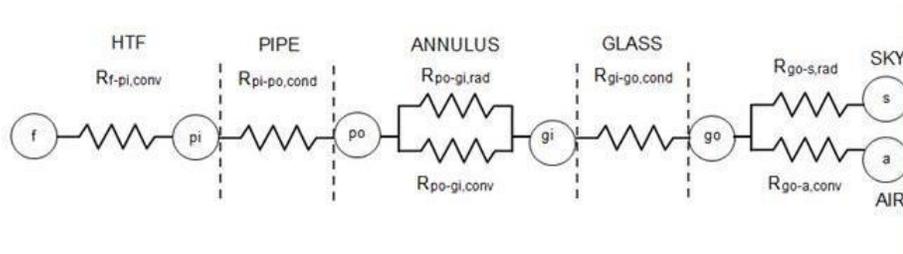


Figura 2.7. Red de resistencia térmica para la sección transversal del tubo receptor para un colector solar de canal parabólico. (Kalogirou A.,2012)

El fluido de transferencia de calor HTF fluye a través del receptor, la energía entrante es absorbida por la cubierta de vidrio (go) y el tubo receptor (po). La mayoría de la energía que es absorbida por el receptor se lleva a cabo a través del material del tubo receptor (pi-po) y finalmente transferido al fluido de transferencia de calor por convección. La energía restante se transmite de vuelta a la cubierta de cristal por convección (po-gi) y radiación (po-gi). (Kalogirou A., 2012)

2.10 Clasificación de concentradores

En colectores concentradores, se pueden clasificar según dos características básicas: la geometría del absorbedor (concentración lineal o puntual) y la forma de la concentración (reflexión o refracción).

Aun teniendo en cuenta esta primera clasificación, todos ellos pueden concentrar la energía solar en un punto específico para conseguir temperaturas muy elevadas que pueden cubrir las aplicaciones industriales, tales como generación de electricidad. La Tabla 2.2 muestra los diferentes colectores en función de la razón de concentración. Debido a la mayor verticalidad de los rayos solares, si consideramos la energía incidente sobre una cierta superficie horizontal y durante un período de

tiempo determinado, por ejemplo durante una o dos horas, resultará que ésta será mucho mayor en las horas centrales del día que en las horas inmediatamente posteriores al amanecer o anteriores a la puesta del sol.

Tabla 2.2. Clasificación de colectores y sus concentraciones.

		Nombre	Razón de concentración "C"	Rango Temperatura Alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Captador plano de agua/aire	$C \leq 1$	$30 < T^a < 250$	
		Tubos de vacío	$C \leq 1$	$50 < T^a < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Colector Parabólico Compuesto (CPC)	$1 < C < 15$	$70 < T^a < 300$	
		Colector Cilíndrico Parabólico (CCP)	$15 < C < 40$	$70 < T^a < 350$	
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico	$100 < C < 1000$	$70 < T^a < 1500$
		Absorbedores puntuales	Torre Central	$100 < C < 1500$	$150 < T^a < 1500$

Gracias al diseño de su superficie reflectante, casi toda la radiación que llega al área de apertura de colector no solo directa también difusa (ver Figura 2.8).

Los CPC son diseñados para lograr la concentración solar con dispositivos estáticos donde puede concentrarse en el receptor toda la radiación “ángulo de aceptación”. Estos mismos deben tener propiedades ópticas ideales, incluso se pueden diseñar para un factor de concentración $C=1$. los valores normales para el semiángulo de aceptación θ_a que oscila entre los 60° y 90° (Blanco *et al.* 1999).

$$C_{CPC} = \frac{1}{\text{sen } \theta_a} = \frac{a}{2\pi r} \quad (2.1)$$

2.12 Diseño geométrico.

Las ecuaciones para obtener el trazado en plano cartesiano del reflector del CPC son descritas por Rabl (1976), las cuales están en función del radio absorbedor tubular, este nos indica el límite del tubo absorbedor a donde llevaremos la radiación, y también son en función del ángulo medio de aceptación. El reflector está formado por dos segmentos distintos una sección de involuta y un segmento de una parábola, como se describen los valores para el eje X y Y como se muestra en las ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

Para la involuta

$$\rho = r\theta \quad \text{Para } |\theta| \leq \theta_a + \pi/2 \quad \text{Parte RP de la curva} \quad (2.2)$$

Para la parábola.

$$\rho = r \left[\frac{\theta + \theta_a + \pi - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\theta - \theta_a)} \right] \quad (2.3)$$

$$\theta_a + \pi/2 \leq |\theta| \leq +3\pi/2 - \theta_a \text{ parte PQ} \quad (2.4)$$

Donde ρ es la distancia de la tangente formada desde el punto tangente del absorbedor a un determinado angulo, para que los valores X y Y, dibujaran la curva del reflector como se puede observar en la figura

En el caso especial de $\theta_a = 90^\circ$, $C=1$ en un sistema solar sin concentración, lo que quiere decir que cualquier fotón que llegue al plano de área de apertura de colector va a poder ser aprovechado por el reactor. (Blesa y Sánchezyhuu,2009).

2.13 Distribución de los rayos solares de un Colector Parabólico Compuesto

Podemos observar en la Figura 2.9 los ejes del CPC x y y con la aclaración de que usa un ángulo de aceptación de 90° para la generación de datos de la gráfica involuta de CPC. La espiral aproximadamente el eje horizontal, dando un área adicional de irradiación al absorbedor. Estos concentradores CPC, tienen una copa denominada, que permite que los rayos sean captados y se dirijan hacia el absorbedor sin importar la dirección incidente en la superficie de la copa (ver figura 2.9). Esta copa siempre esta iluminada y reflejada a la superficie del absorbedor, porque tiene un ángulo sólido de 2 para aprovechar la radiación directa y la difusa, este fenómeno no ocurre con los Concentradores Cilíndricos Parabólicos CCP. En diseño de concentrador se compone de dos geometrías diferentes; la primera corresponde a la sección de involuta, generada a partir de las dimensiones del receptor y la segunda

corresponde al segmento de una parábola cuyo eje tiene un ángulo con respecto al eje vertical del CPC (Gutiérrez y Flores, 2009)

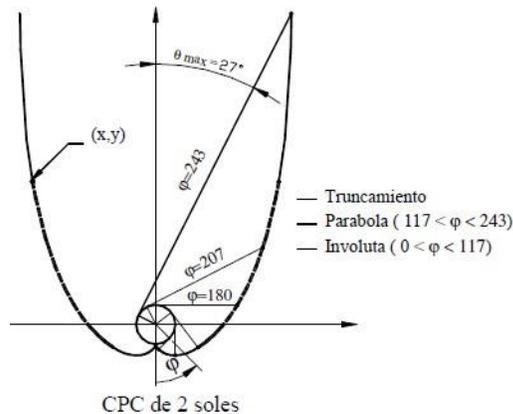


Figura 2.9. Partes principales como son la involuta, las parábolas y el receptor cilíndrico.

Debido estas características geométricas los CPC no son construidos con un sistema de seguimiento solar así como su máxima eficiencia de captación solar se logra colocándolos con una inclinación igual a la latitud del lugar y alineados con una orientación **este-oeste** (McLoughlin *et al.* 2004b).

La imagen de la Figura 2.10 fue comparable a la reportada en la literatura que fue obtenida a partir de programas informáticos comerciales. Eso indica que las ecuaciones propuestas eran confiables y podían modelar fielmente el fenómeno de reflexión de la radiación solar directa en un CPC. Toda la radiación directa que golpeó las superficies del colector podría reflejarse en el absorbedor circular como se esperaba. (Blanco *et al.* 1999, Malato *et al.* 2004, McLoughlin *et al.* 2004a, Alfano *et al.* 2000)

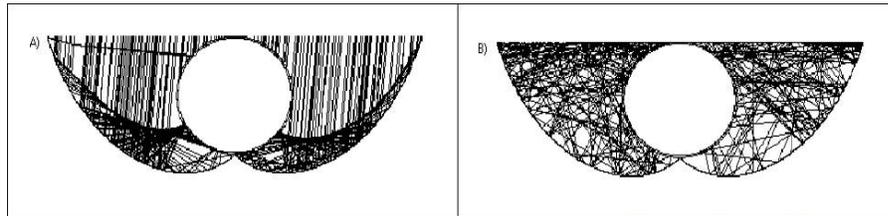


Figura 2.10. A) Reflexión directa, B) Reflexión difusa Blesa y Sánchez. (2001d).

2.14 Uso de fluidos de transferencia de calor en Colectores Solares Parabólicos

Las aplicaciones térmicas están trayendo cada vez más la atención en el campo de la investigación de la energía solar debido a su alto rendimiento en la densidad de almacenamiento de energía y la eficiencia.

El diagrama en la Figura 2.11 resume las características de un fluido de transferencia de calor y sus propiedades para que sea un buen candidato como fluido de trabajo.

(Tian & Zhao, 2013) estudiaron los términos de criterios de selección de materiales de transferencia de calor y realizaron procedimiento acerca de las propiedades que debe tener un fluido para ser buen conductor de calor.

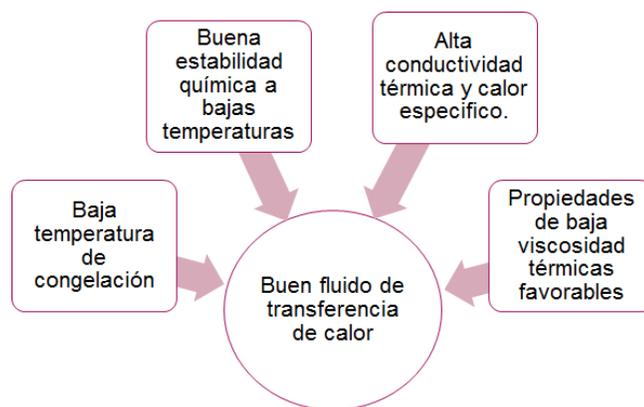


Figura 2.11. Características de un fluido de transferencia de calor.

Los fluidos de transferencia de calor deben tener una alta capacidad de calor específico, alta conductividad térmica, baja viscosidad, bajo coeficiente de expansión térmica y bajo costo. Se pueden identificar varios ejemplos de fluidos de transferencia de calor como agua, grupos de glicol, aceites de silicio y aceites de hidrocarburos donde el agua es la mejor entre los fluidos porque tiene sus propias ventajas que son de bajo costo, más fácilmente disponibles y térmicamente eficientes- (Jamar *et al* 2016).

(Atul Shalma *et al.* 2016) Reportaron el almacenamiento de calor sensible de algunos materiales seleccionados donde el agua parece ser el mejor para almacenamiento de calor sensible debido a su bajo costo y su alto calor específico (4190 J/kgK) Otro de los materiales promisorios son las sales de almacenamiento por su conductividad térmica que tiene una dependencia de temperatura relativamente alta como transmisor de calor consiste en que esto eliminaría la necesidad de usar calor con las sales en el campo solar puede operar a temperaturas más altas. Los líquidos iónicos poseen características muy interesantes, pero su aplicación aun no es considerada viable. Las propiedades escasas del aire como fluido térmico limitan su uso a aplicaciones muy específicas de calor de proceso. Publicaron valores de tabulados de la viscosidad dinámica, cinemática y capacidad de calor específico de las soluciones acuosas de Cloruro de Sodio las tablas cubren el intervalo de temperatura de 20-150°C e intervalo de presión de 0.1-35 MPa. (Kestin *et al* 1981)

No se encuentra información en la literatura, acerca de colectores solares con cubierta de cobre y sales en estado acuoso por el siguiente motivo se considera que el sistema es novedoso y de futura aportación científica al campo de la investigación solar.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Diseño y construcción del colector solar parabólico compuesto

La construcción de este proyecto es de interés teórico experimental, tomando en cuenta las condiciones de radiación solar, conductividad térmica de los diferentes fluidos de trabajo, así como de la elección de materiales adecuados para las combinaciones en el CPC.

En este capítulo se detalla el diseño para un CPC con el fin de elevar la temperatura del agua. Este equipo fue diseñado para que permanezca sin seguimiento solar.

3.2 Primera parte experimental

En la primera instalación del CPC se colocaron de manera consecutiva tubos concéntricos en placas reflectoras parabólicas compuestas. El colector solar de 0.135 m² de área está constituido por tres elementos fundamentales: una placa absorbidora, una cubierta transparente y una placa reflectora. Cabe mencionar que este colector solar está compuesto por una configuración propuesta de tubos de vidrio en la parte externa del absorbedor compuesto por un material de tubo de cobre como se puede observar del lado derecho de la figura 3.1, para el segundo arreglo una configuración de tubo cobre como cubierta y un absorbedor de cobre del lado izquierdo de la figura 3.1, todos estos materiales son de bajo costo y de fácil consecución. Este sistema se montó en una base de madera con una inclinación de 18 grados respecto a la orientación de Cuernavaca. Éstos fueron sometidos a las mismas condiciones climatológicas.

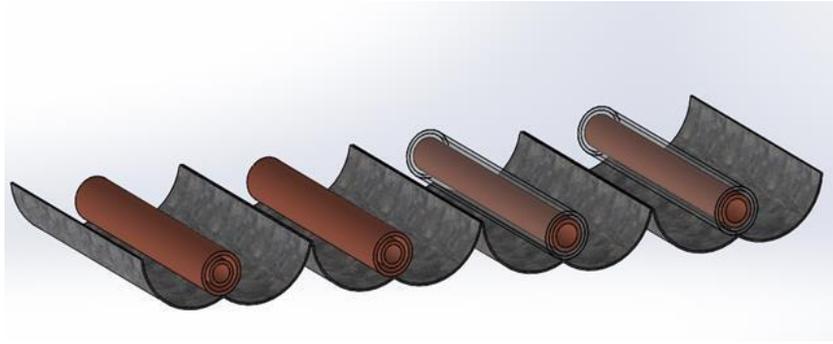


Figura 3.1. Primer prototipo de CPC con diferentes configuraciones.

3.3 Fluidos de trabajo para CPC.

De acuerdo con los fluidos de trabajo a implementar como se muestra en la Figura 3.2 se utilizó aire (A) y agua (B), de igual manera se utilizó NaCl en solución como fluidos de interface entre absorbedor y receptor.

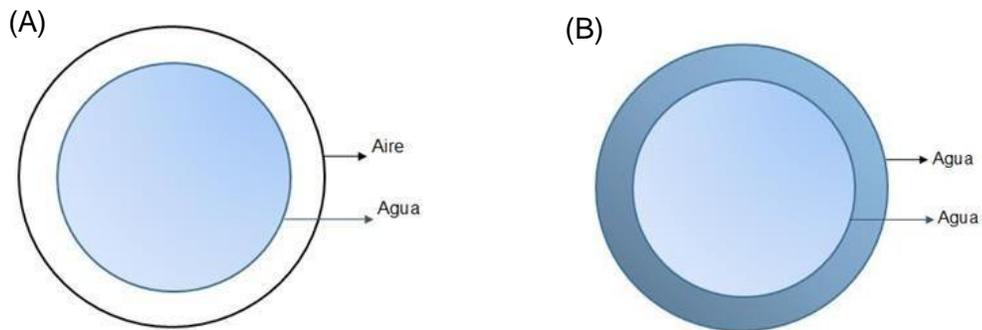


Figura 3.2. Diagrama de fluidos de trabajo en la interface del tubo CPC, (A) Fluido de aire, (B) Fluido de agua.

Zalba *et.al*(2003). Realizaron un análisis de las propiedades termofísicas de con sus respectivos valores de conductividad térmica y densidades aplicados al almacenamiento de energía térmica de los materiales, debido a su capacidad de conducir calor se sustituye en la configuración del CPC para evaluar su funcionamiento. En esta revisión los compuestos cloruros parecen

los más prometedores por debajo de 100°C, para el funcionamiento de los sistemas de calor latente, requiriendo el uso de las geometrías de colector para obtener el calor requerido y las tasas de calor. Haciendo referencia a estas investigaciones se muestran a continuación en la Tabla 3.1 las propiedades termofísicas de los fluidos a implementar.

Tabla 3.1. Propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo.

Fluido	Agua	Aire	NaCl
ρ (kg/m ³)	991.05	1.118	2160
Cp(kJ/kgK)	4.1802	1.0058	4.06
K (W/mK)	0.61	0.0250	5

Zalba y Marín (2003) Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications.

3.4 Materiales propuestos para cubierta del CPC

Las principales características requeridas de los materiales para cubierta son sus propiedades de conductividad térmica, así mismo se evaluara cuál tiene mejor capacidad para transferir calor. Los metales tienen altas conductividades térmicas que varían con la temperatura el cobre es uno de materiales con un valor de conductividad elevado. En la Tabla 3.2 se muestran los valores de conductividades de los materiales fundamentales para un CPC.

Tabla 3.2. Propiedades de conductividad térmica de materiales sólidos.

Material	Coefficiente de conductividad térmica.
Vidrio	1.100 W/mK
Cobre	401 W/mK

Frank P. Incropera y David P. DeWitt, "Fundamentos de la Transferencia de Calor" 4ª Ed., Prentice Hall, México, 1999. Apéndice A

3.5 Dimensionamiento de CPC

La Tabla 3.3 describe cada uno de los componentes dimensionales y geométricos de los tubos recibidores y absorbedores, el tipo de material que se llevara a cabo en función de la configuración adoptada en la Figura 3.1.

Tabla 3.3. Dimensiones de CPC

Tubo de vidrio Duran™	De	3mm	0.003m
Espesor	E	0.63mm	0.00063m
Diámetro interno	Di	28mm	0.028m
Longitud del tubo	L	500mm	0.050m

Tubo de cobre	De	9.52mm	0.00952m
Espesor	E	0.63mm	0.00063m
Diámetro interno	Di	8.89mm	0.00889m
Longitud del tubo	L	520mm	0.052m
Fcil	Fcil	182mm	1.82e-1m
Longitud Característica	Lc	10.24mm	0.01024 m

3.6 Calibración para el adquisitor de datos

El equipo para medición de temperatura en la Figura 3.3, se instrumentó y calibró con termopares tipo T, utilizando adquisitor de datos AGILENT 34970 A. Con un intervalo de temperatura de 20 a 70°C, con un incremento de 5°C. Las mediciones se realizaron mediante la plataforma BenchLink Data Logger. Mediante esta plataforma se calculó la pendiente obteniendo la ecuación de la recta de cada termopar, así como, los errores de cada uno. Los errores se introdujeron en el software del adquisitor de datos para asegurar una mayor precisión en los valores colectados. Los termopares calibrados fueron conectados en el CCP.



Figura 3.3. Calibración de adquisitor de datos.

3.7 Montaje de CPC en laboratorio

Para el montaje del CPC (ver la Figura 3.4) se utilizaron diferentes materiales, estos fueron ensamblados a una placa reflectora, se colocaron tapones de hule a presión en la boquilla de cada tubo (A), el tubo absorbedor es de cobre liso flexible para refrigeración, se utilizó silicón alrededor del tapón de hule para evitar las pérdidas de calor al ambiente, también se midió la temperatura de la superficie del receptor (B) para

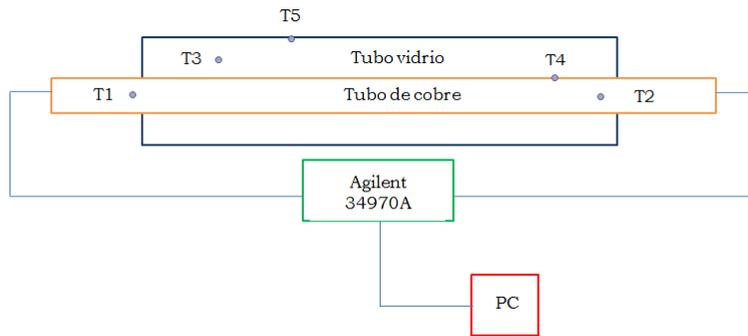
cálculos de coeficientes convectivos, potencia útil y energía absorbida en el colector solar. Finalmente se muestran el montaje final del sistema con la configuración propuesta (C).



Figura 3.4. (A) Colocación de termopares en tubo colector, (B) Termopar en la parte exterior del tubo, (C) Montaje de CPC en laboratorio.

3.8 Ubicación de termopares en tubo concéntrico

Es importante la posición de los termopares debido a que esta medición de temperatura es fundamental para el cálculo de coeficientes convectivos, conductivos y potencia del sistema. La Figura 3.5 presenta la ubicación de los termopares para cada tubo concéntrico, se utilizaron veinte termopares en total, cinco para cada tubo.



- T_1 = Entrada fluido
- T_2 = Salida fluido
- T_3 = Entrada fluido de vidrio o cobre
- T_4 = Pared tubo de cobre absorbedor
- T_5 = Exterior de cubierta (vidrio o cobre)

Figura 3.5. Ubicación de termopares en tubo concéntrico.

3.9 Montaje de la experimentación para primer sistema

La Figura 3.6 muestra el montaje final del experimento, sometido a las condiciones ambientales. Sobre una estructura metálica se montó el sistema compuesto por dos tubos de vidrio como receptores con absorbedores de cobre, para los dos consecutivos se configuraron con cobre como receptor y cobre como absorbedor. Los datos experimentales se recolectaron durante un mes, las mediciones se realizaron por minuto en un horario de 11:00 am a 3 pm. El sistema fue colocado con una orientación de Este-Oeste. La evolución del proceso se siguió en función de las temperaturas en cada extremo de los tubos durante los periodos de tiempo de la exposición a la energía solar. Estos experimentos se realizaron en presencia de agua y aire, tomando 18 mL de agua en el tubo absorbedor.



Figura 3.6. Montaje final de sistema.

3.10 Cálculos para dimensionamiento de CPC

En el análisis de dimensionamiento para CPC se tomaron en cuenta las características de que los tubos son de pared delgada y, como consecuencia resulta razonable suponer que su área superficial de transferencia de calor A_s (m²) queda. (Duffie y Beckham, 2004)

Dónde: D es el diámetro de tubo de la cubierta (m), L es la longitud del receptor (m).

$$A_s = \pi DL \quad (3.1)$$

Mediante la siguiente ecuación se calcula el área de apertura A_a del tubo receptor, se tiene en cuenta el sombreado de la parte central del colector por el receptor.

$$A_a = (A - D_o)L \quad (3.2)$$

A_a el área de apertura de da en m^2 . A es Anchura de parábola (m), L es la longitud (m), D_o el Diámetro externo de cubierta de vidrio o cobre (m).

El área superficial para la transferencia de calor de la cubierta es igual

$$A_o = D_o L \quad (3.3)$$

Dónde: D_o es Diámetro externo de la cubierta (m), L Longitud del vidrio (m)

Usando las relaciones de convección natural para tubos concéntricos horizontales, la longitud característica es la distancia entre los dos cilindros, la cual es.

$$L_c = (D_o - D_i)/2 \quad (3.4)$$

Dónde: D_o =Diámetro externo de la cubierta (m), D_i = Diámetro interno del absorbedor (m).

El factor geométrico para cilindros concéntricos F_{cil} .

$$F_{cil} = \frac{\left[\left(\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \right) \right]}{L_c^3 (D_i^{3/5} + D_o^{3/5})^5} \quad (3.5)$$

Dónde: F_{cil} = Factor cilíndrico (Adimensional), D_o =Diámetro externo cubierta (m), D_i =Diámetro interno del absorbedor (m), L_c es la longitud característica (m).

Una vez que se obtuvo el valor del factor geométrico se calculó la conductividad térmica efectiva. La relación recomendada para la conductividad térmica efectiva es de Raithby y Holands (1975).

$$\frac{K_{eff}}{k} = 0.386 \left(\frac{Pr}{0.816 + Pr} \right) \quad (3.6)$$

Donde K_{eff} =conductividad térmica efectiva, K = Conductividad térmica W/mK, Pr =Numero de Prandtl (Adimensional).

El coeficiente de expansión volumétrica representa la variación de densidad de una sustancia con la temperatura a presión constante que depende de la temperatura en °C.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3.7)$$

Una vez obtenido el coeficiente de expansión volumétrica, se calcula el Grashoff que rige un numero adimensional el cual representa la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido. (Cengel, 2007).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu} \quad (3.8)$$

Donde

g = aceleración gravitacional, m/s^2

β = coeficiente de expansión volumétrica

T_s = temperatura de la superficie, °C

T_∞ = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, °C

L_c = longitud característica de la configuración geométrica, m

ν = viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

3.11 Ecuaciones de energía para CPC

Con las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), se siguen en el procedimiento analítico de Q_u (potencia útil), y a través del uso del factor de eliminación de calor, donde F_r considerando a 1, se puede obtener una expresión para la potencia útil, aplicando la radiación solar absorbida. Bajo condiciones de estado estacionario, el calor útil entregado por un colector solar es igual a la energía absorbida por el fluido de transferencia de calor menos las pérdidas de calor directas e indirectas desde la superficie hacia su alrededor. La energía útil de un colector puede ser obtenida de la siguiente fórmula: (Duffie y Beckham, 2004).

$$Q_u = F_r \cdot A_s \left[I_s - \frac{A_r}{A_s} U_l (T_i - T_a) \right] \quad (3.9)$$

A_s =Area superficial (m^2)

I_s =Radiación solar (W/m^2K)

A_r =Área de receptor (m^2)

U_l =Perdidas de calor

T_i =Temperatura de la placa ($^{\circ}C$)

T_a =Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

3.12 Análisis térmico de un colector solar parabólico compuesto

En esta sección se lleva a cabo un análisis térmico solar, tomando en cuenta los materiales con los que se ha desarrollado el colector, así como sus dimensiones geométricas. Uno de los parámetros básicos que se deben considerar para el cálculo térmico de un CPC en la primera fase experimental

es el Rayleigh debido a que este sistema se encuentra en un estado estacionario donde se presenta el fenómeno por convección natural que es inducida solamente por fuerzas de flotación, y por tanto, en ella no existe una velocidad de convección forzada bien definida, por lo tanto se realiza con la siguiente ecuación reportada (Cengel, 2007). El valor adimensional de número de Prandtl se obtiene a partir de la Tabla A-15 APENDICE B para aire y del software NYST para el caso del agua.

$$Ra_{D_o} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D_o}{\nu^2} Pr \quad (3.10)$$

Dónde:

g = Aceleración gravitacional m/s^2

β =Coeficiente de expansión volumétrica, $1/K$

T_s =Temperatura de la superficie $^{\circ}C$

T_∞ =Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie $^{\circ}C$

L_c = Longitud característica de la configuración geométrica

α =Viscosidad cinemática del fluido

Pr =Prandtl

La transferencia de calor por convección natural sobre una superficie depende de la configuración geométrica de ésta así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene.

El número adimensional de Nusselt (Nu), que relaciona los mecanismos de transferencia de calor por convección y conducción. Se puede determinar el número promedio de Nusselt sobre la superficie completa con base en la ecuación Churchill y Chu (1983).

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D D^{1/6}}{\left[1 + \left(0.559/Pr \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.11)$$

En donde:

Ra=Numero de Rayleigh Adimensional, D=Diámetro (m), Pr=Prandtl

3.13 Análisis de coeficientes convectivos

El coeficiente de transferencia h_{conv} fue calculado a partir de la expresión (3.12) empleando los valores de temperatura correspondientes a funcionamiento en estado estacionario, siendo K el cociente entre la conductividad térmica D_{ext} el espesor del vidrio de la cubierta y Nu numero de Nusselt.

$$h_{conv} = \frac{k}{D_{ext}} Nu \quad (3.12)$$

Para la ecuación 3.13 h es función principalmente de la velocidad, la temperatura del fluido y de los potenciales cambios de estado que experimente el fluido durante el proceso de transferencia. El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un

parámetro que se determina en forma experimental cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. La Figura 3.7 muestra valores típicos de h en los diferentes tipos de convección. (Cengel,2007)

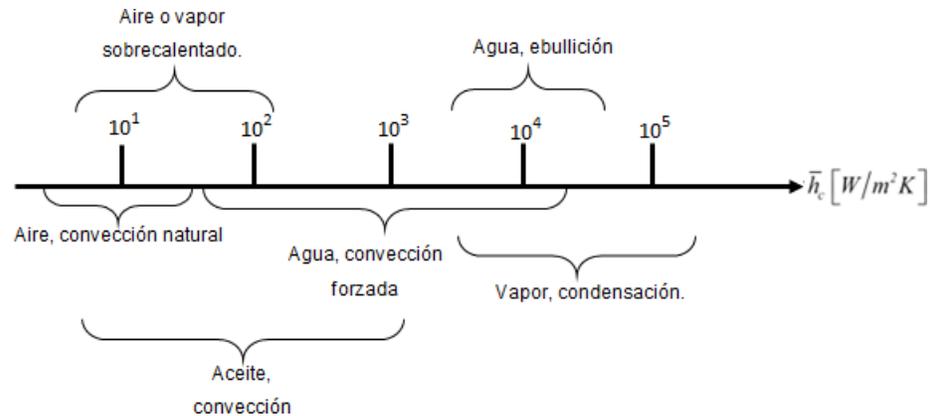


Figura 3.7. Valores estándar de coeficiente convectivo.

El cálculo de coeficiente convectivo involucra

$$h_{conv} = \frac{2 K_{eff}}{D_{ext} \frac{D_{c_{int}}}{D_{r_{ext}}}} \quad (3.13)$$

Dónde: K_{eff} Conductividad térmica efectiva, $D_{c_{int}}$ =Diámetro de la cubierta interno (m), $D_{r_{ext}}$ =Diámetro de tubo receptor externo (m)

3.14 Evaluación de coeficientes en análisis térmico solar

El coeficiente global de pérdidas térmicas U_L , se determina a partir de la temperatura promedio de la placa de absorción, la cual a su vez, requiere la determinación de la temperatura del tubo, del agua a lo largo de todo el tubo

y del factor de remoción de calor. Usualmente, para reducir las pérdidas térmicas, se emplea una tubería de vidrio concéntrica alrededor de la tubería receptora. El espacio entre la tubería de vidrio y la tubería receptora se encuentra usualmente en vacío, de esta manera las pérdidas por convección son prácticamente insignificantes. Para reducir las pérdidas térmicas, se emplea una tubería de vidrio concéntrica alrededor de la tubería receptora. El espacio entre la tubería de vidrio y la tubería receptora se encuentra usualmente en vacío, de esta manera las pérdidas por convección son prácticamente insignificantes. En caso se decida la construcción de la tubería receptora con tubería de vidrio en vacío, el coeficiente global de pérdidas térmicas, U_l que estará dado por la ecuación (3.14) Duffie and Bekham (2006).

$$U_l = \frac{A_r}{(h_w + hr_{c-a})} + \frac{1}{hr_{r-c}} \quad (3.14)$$

Dónde:

A_r = Área de la superficie externa de la superficie receptora de cobre (m^2).

A_w = Área de la superficie externa de la cubierta de vidrio del receptor (m^2).

h_w = Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie externa de la cubierta de vidrio al exterior. ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

hr_{c-a} = Coeficiente lineal de transferencia de calor por radiación desde la cubierta de vidrio al exterior. ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

hr_{r-c} = Coeficiente lineal de transferencia de calor por radiación desde la tubería receptora.

El coeficiente de transferencia h_{conv} del tubo receptor a la cubierta fue calculado a partir de la emisividad de los materiales, empleando los valores de temperatura correspondientes al funcionamiento de un estado estacionario. El coeficiente de radiación entre la superficie de absorción y la superficie transparente ($h_{rad\ r-c}$) se calcula mediante la ecuación (3.15), considerando Duffie and Bekham (2006).

$$h_{r-c-a} = \frac{\sigma(T_r^2 + T_c^2)(T_r + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{A_r}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1\right)} \quad (3.15)$$

Donde

σ =constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$)

T_r =Temperatura del receptor ($^{\circ}\text{C}$)

T_c =Temperatura de la cubierta de vidrio ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ_r =Emisividad del receptor (Adimensional)

ϵ_c =Emisividad de la cubierta de vidrio (Adimensional)

T_{sky} se evalúa en función de la temperatura ambiente

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (3.16)$$

Dónde: ϵ =Emisividad de la cubierta T_{sky} =Temperatura $^{\circ}\text{C}$, T_c =Temperatura de la cubierta $^{\circ}\text{C}$.

Para el cálculo de coeficiente radiativo de la cubierta al ambiente, ahora bien, para poder determinar el coeficiente total de pérdidas UL se requiere

determinar el coeficiente de radiación de la cubierta al ambiente hr_{c-a} y el coeficiente de radiación entre el tubo receptor y la cubierta hr_{r-c} . Díaz (2016).

$$hr_{c-a} = \varepsilon c \sigma (T_{sky}^2 + T_c^2) (T_{sky} - T_c) \quad (3.17)$$

Dónde: ε =Emisividad de la cubierta, T_{sky} =Temperatura °C, T_c =Temperatura de la cubierta.

3.15 Segunda parte experimental

Aplicando la metodología propuesta con base en los resultados utilizando tubos de cobre como cubierta y vidrio, se opta por utilizar tubos de vidrio en toda la configuración, de igual modo analizar las temperaturas. El montaje experimental (ver Figura 3.8) fue en la misma base de placas, los cuatro tubos fueron sometidos a las mismas condiciones climatológicas a diferentes concentraciones de NaCl/H₂O, al mismo tiempo se considera como fluido solamente agua para poder realizar la comparación de los coeficientes convectivos tanto del agua como del NaCl en solución.



Figura 3.8. Segundo prototipo de CPC con diferentes configuraciones.

En la segunda parte experimental se eligió Cloruro de Sodio como mejor material de trabajo, se consideró la conductividad del cloruro en peso de soluto y de la disolución. La Figura 3.9 (A) muestra el Cloruro de Sodio en una balanza calibrada, se pesó la cantidad de Cloruro de Sodio requerido para la concentración, que se colocó en el CPC. Para preparar las soluciones se aforo a 500 ml de Cloruro de Sodio (B).

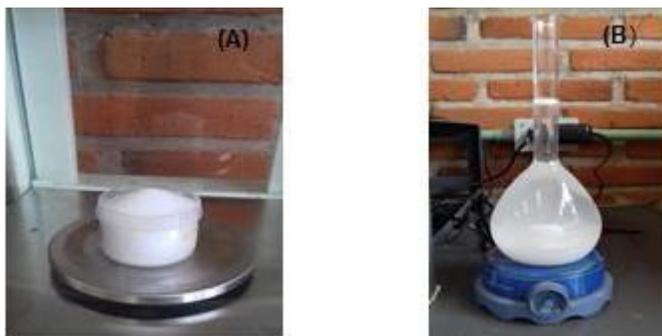


Figura 3.9. A) NaCl sólido, B) Cloruro de Sodio acuoso aforado.

En una balanza calibrada se pesó la cantidad de Cloruro de Sodio requerido para la concentración, que se colocara en el CPC la Tabla 3.4 indica las cantidades necesarias para cada caso.

3.16 Análisis estequiométrico

Para la solubilidad de un compuesto en un determinado solvente depende de la naturaleza química del soluto, solvente, y la temperatura. En la siguiente tabla se muestran las concentraciones de solubilidad que se emplearon en el sistema.

En la siguiente tabla se muestran las solubilidades y masa a las fue sometido el colector que se calcularon con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{m}{pm} \quad (3.18)$$

Donde n es número de moles m es la masa del Cloruro de Sodio y pm el peso molecular del compuesto .La Tabla 3.4 presenta los valores calculados con la ecuación (3.18) las cantidades de masa que se debe colocar en cada tubo.

Tabla 3.4. Peso de NaCl a diferentes solubilidades.

Reactivo NaCl	Solubilidad	Masa	Molaridad	%
Máxima Solubilidad	359 g/L	179.5 g	3.09 mol	26.4
Media solubilidad	161.5 g/L	88.5 g	1.54mol	5.2
Máxima solubilidad/10	35.9 g/L	17.95 g	0.30 mol	2.6

3.17 Metodología para la tercer parte experimental

La tercer parte experimental se utilizó un colector solar de canal parabólico tipo industrial este se sometió a condiciones de flujo turbulento. La Figura 3.10 (A) muestra el fluido de agua en la parte intermedia del absorbedor y el receptor, mientras en (B) se observa el montaje final del sistema en condiciones climáticas. Se realizó una comparación con aire, en diferentes condiciones de operación. La medición de fluido de aire se llevó a cabo en septiembre realizadas por la alumna de Maestría Gisselle Ramos en el año 2016. Para la segunda parte experimental con agua se fue realizada en Abril 2017.

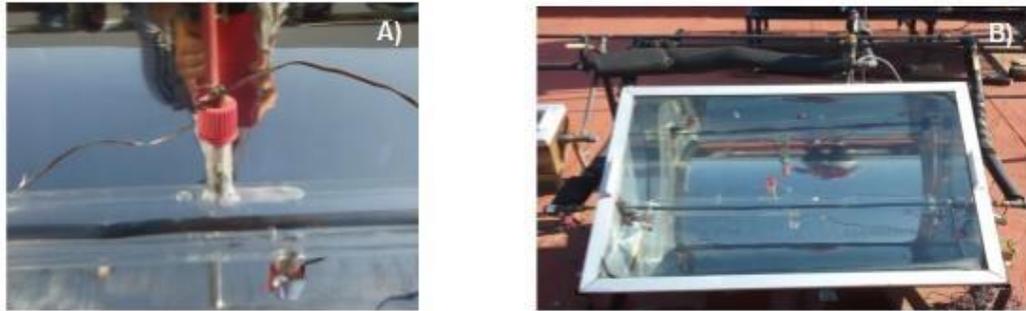


Figura 3.10. A) Fluido de agua en interface CPC, B) Montaje final CPC.

Se colocó agua en la parte intermedia del absorbedor y cubierta, El sistema de pruebas experimentales estuvo compuesto por: un CCP, una superficie reflectora de acero inoxidable 316L, un tubo absorbedor de vidrio doblemente encaquetado en el exterior, un tubo de cobre interiormente de $\frac{1}{4}$ pulg en el interior, dos tanques de agua, un flujómetro, dos bombas de agua y una tapa de vidrio. (Ramos, 2017)

CAPÍTULO 4

3. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Resultados de primer diseño experimental

4.1.1 Análisis de resultados utilizando diferentes fluidos de trabajo con recubrimientos de vidrio y cobre.

La Figura 4.1 muestra las temperaturas del agua en el tubo absorbedor, de las diferentes combinaciones con fluidos de trabajo agua y aire en materiales de vidrio y cobre.

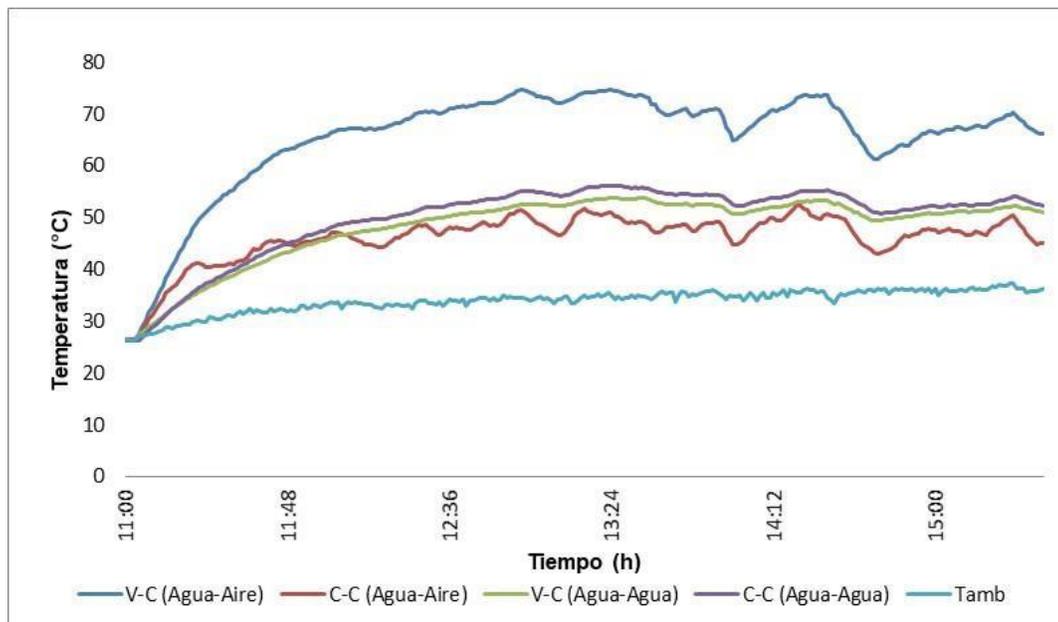


Figura 4.1. Perfil de temperatura para las configuraciones del primer sistema.

La Figura 4.1 presenta los resultados de temperaturas, de acuerdo con las configuraciones, la que presenta mayor temperatura fue el de vidrio-cobre con una temperatura máxima de 70°C utilizando la configuración cobre-vidrio con fluido de aire. En el caso del cobre-cobre se obtiene una mayor temperatura con agua en el tubo absorbedor y agua en la interface del cobre-cobre, a una temperatura ambiente promedio registrada de 33°C. Se infiere que utilizando vidrio como cubierta con aire como fluido de trabajo se llega a una mayor temperatura debido a que los rayos radiativos traspasan un medio transparente de espesor finito lo permite la incidencia de los rayos de manera directa al tubo absorbedor.

La segunda configuración con mayor temperatura registrada fue del cobre-cobre con fluido de agua alcanzando una temperatura máxima de 56.24°C este valor se asocia con el calor específico del agua aproximado de 4.18 kJ/kg°C.

4.1.2. Comportamiento de temperaturas en diferentes días

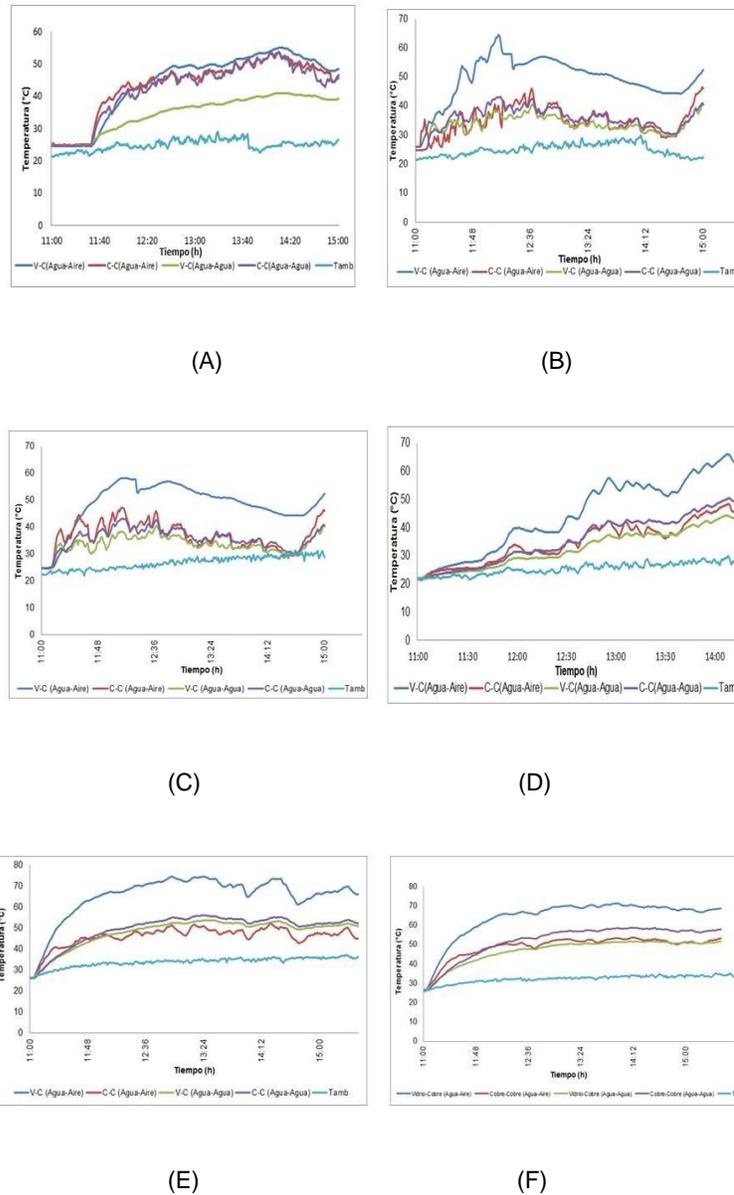


Figura 4.2. Comportamiento de temperatura para las pruebas (A) 26 Abr 17, (B) 28 Abr 17, (C) 3 May 17, (D) 16 May 17, (E) 18 May 17, (F) 29 May 17

Se presenta en la Figura 4.2 las temperaturas del agua en el tubo absorbedor de cobre para los cuatro tubos de la configuración mencionada en el Capítulo 3 Figura 3.1 ,en todas las experiencias se observó un comportamiento similar en tubos de calor, con cuatro intervalos de características bien definidas. Al comienzo hay un calentamiento transitorio en el que se evidencia una fuerte absorción de calor. A continuación se ve un rango donde las temperaturas disminuyen con oscilaciones de baja frecuencia.

La primera observación es que tanto las cubiertas cobre y vidrio presentan un comportamiento similar, se aprecia claramente un aumento en la temperatura con aire como fluido de trabajo a comparación de los demás.

Los resultados de las medias de la serie4 que pertenecen al cobre-cobre con agua se observa una proximidad insignificante con la serie 2 del cobre-cobre con aire. Finalmente el de menor ganancia de temperatura se da en la configuración del vidrio-cobre con agua como fluido de trabajo.

4.2 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con aire.

La Figura 4.3 presenta los coeficientes convectivos de la interface entre el vidrio-cobre y cobre-cobre con aire y agua en la parte intermedia del colector.

Como resultado desarrolla un perfil de coeficiente donde este varía con respecto a su incremento de temperatura. El coeficiente convectivo fue graficado con respecto a la diferencia de temperatura de fluido y la temperatura de la cubierta.

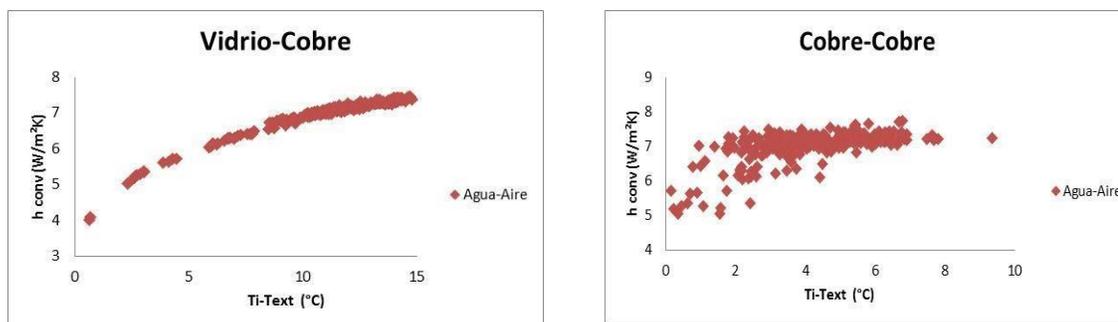


Figura 4.3. Coeficiente convectivo interno de vidrio y cobre con aire.

A medida que aumenta la temperatura, se puede observar que el intervalo de temperaturas del vidrio es mayor y estable a comparación del cobre, la inestabilidad del cobre se manifiesta al inicio de la experimentación con una dispersión más amplia lo que indica que tarda más tiempo en que las moléculas del fluido se muevan y su temperatura se eleve, el cual muestra un rango de temperatura menor que usando vidrio.

Los coeficientes convectivos con cubierta de vidrio adquieren valores semejantes que el cobre, a excepción de la distribución de utilizando cobre, a pesar de que el fluido es el mismo

4.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta al ambiente con aire

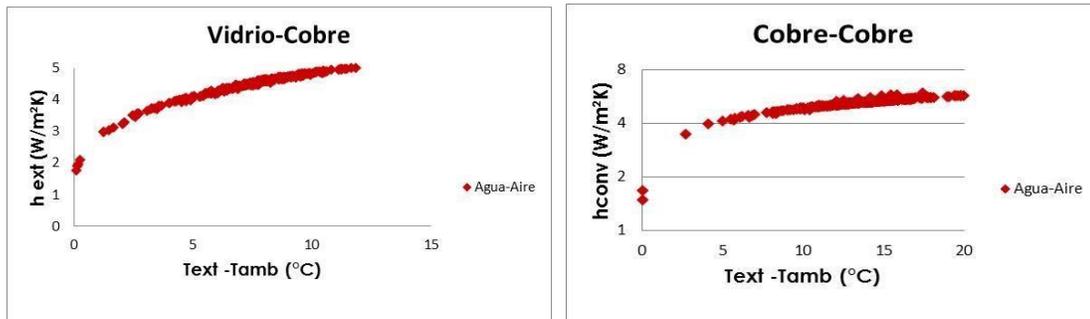


Figura 4.4. Coeficiente convectivo externo del vidrio y cobre con aire.

El coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta al ambiente h_{conv} fue calculado a partir de las correlaciones de transferencia, mostradas en la ecuación 3.13 mencionadas en el Capítulo 3, se emplean los valores de temperatura obtenidos experimentalmente correspondientes al funcionamiento del sistema.

Para los coeficientes con material de vidrio presenta un comportamiento similar, al de cobre como cubierta, en la interface, con un comportamiento inestable, y una dispersión de parámetros obsérvese en la Figura 4.4 el coeficiente por convección más elevado se presenta utilizando cobre, debido a las propiedades conductivas del cobre, se obtiene un h_{conv} máximo de 7 W/m²K y para el vidrio un h_{conv} máximo de 5 W/m²K.

4.2.2 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con agua

La evolución tanto de la temperatura del agua como de su coeficiente convectivo se representa gráficamente en la figura 4.5, muestra la transición del agua con vidrio y cobre.

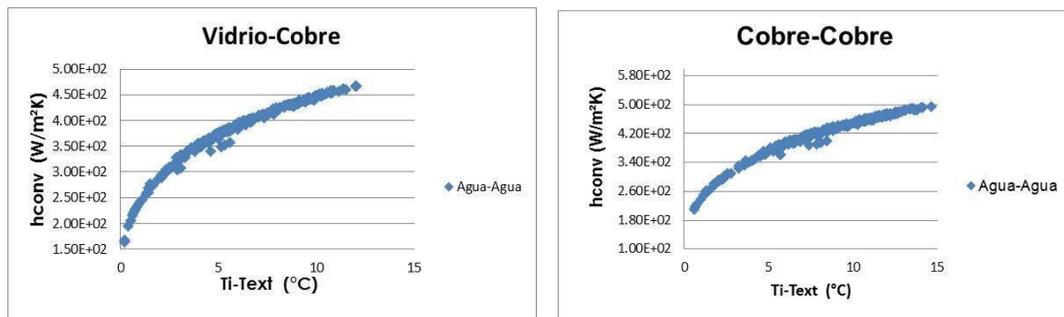


Figura 4.5. Coeficiente convectivo interno de vidrio y cobre con agua.

Los resultados obtenidos demuestran que el cobre presenta coeficientes altos en comparación al vidrio de igual manera adquiere un intervalo de temperatura más amplio. Lo que repercute en su coeficiente convectivo.

Las propiedades difusionales del agua; particularmente su viscosidad cinemática, su difusividad térmica y la difusividad molecular del agua; son determinantes en la forma en cómo se desarrollan las capas límite entre la superficie y el fluido. La analogía de este fenómeno difusional; permite relacionar de manera simultánea la transferencia en cantidad de movimiento.

De acuerdo con el concepto de difusividad térmica un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica, tiene una gran difusividad térmica, es decir más rápida es la propagación de calor hacia el medio. (Cengel, 2007)

4.2.3 Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido a la cubierta con agua

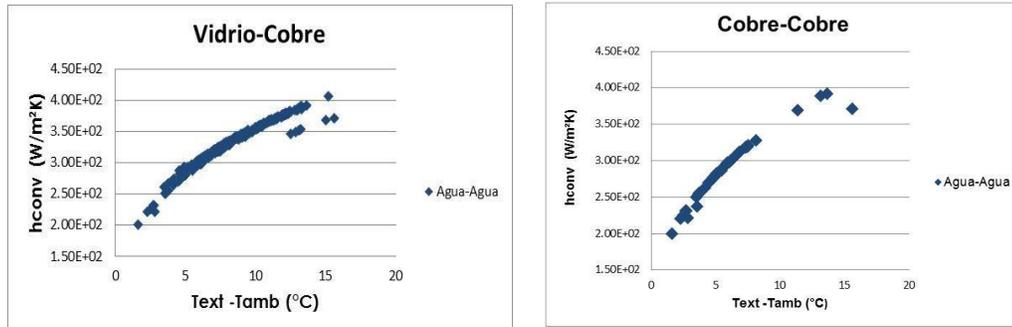


Figura 4.6. Coeficiente convectivo externo del vidrio y cobre, utilizando agua como fluido de trabajo.

En la Figura 4.6 se observó que la influencia del fluido de trabajo de agua sobre el comportamiento térmico del coeficiente convectivo, el transporte de calor máximo obtenido fue de $6e2 \text{ W/m}^2\text{K}$ acuerdo a la tendencia de los resultados es posible aseverar que mientras mayor conductividad térmica presente el fluido, mayor será la dependencia de obtener mejor transición de calor. Se puede observar la dispersión de valores de manera ascendente donde el coeficiente convectivo máximo se adquiere a mayores temperaturas cuyo valor es de $5.05e2$ para la configuración de Cobre-Cobre. En este caso este comportamiento es característico en flujos laminares que cumple con la tendencia de capa limite térmica de aquí la convección existirá solo si se obtienen las temperaturas de la superficie (T_s) y del flujo libre (T_∞).

Sin embargo las partículas del fluido que hacen contacto con la placa alcanzan el equilibrio a la temperatura de la superficie de la placa. A su vez, estas partículas intercambian energía con las de la capa adyacente de fluido y se producen en el fluido gradientes de temperatura. La región del fluido en la que existen estos gradientes de energía es la capa limite térmica.

Los coeficientes máximos obtenidos para el primer sistema ver Tabla 4.1, donde el valor máximo convectivo para las cuatro diferentes configuraciones se obtiene con materiales cobre-cobre con fluido de agua, y el coeficiente menor con cobre utilizando aire.

Tabla 4.1. Coeficientes convectivos máximos para primer sistema.

Configuración	Fluido	h_{conv} W/m ² K
Vidrio-Cobre	Aire	7.75
Cobre-Cobre	Aire	6.73
Vidrio-Cobre	Agua	4.75e2
Cobre-Cobre	Agua	5.05e2

4.3 Condiciones climatológicas para primer sistema

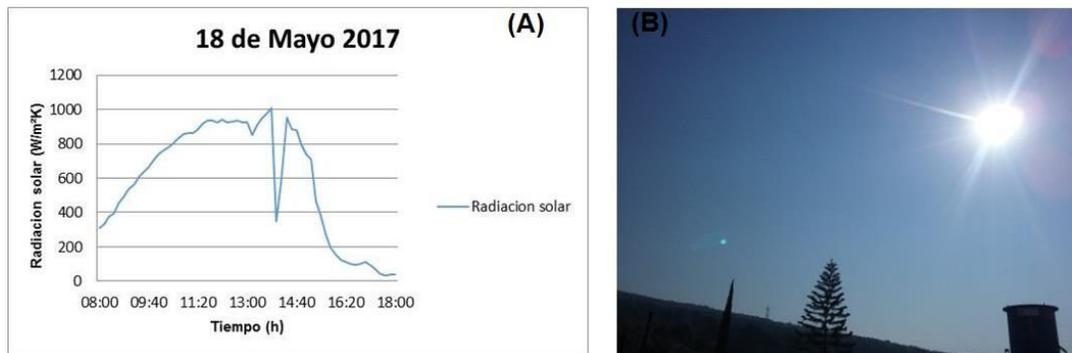


Figura 4.7. (A) Radiación solar de día de la medición, (B) Condiciones climatológicas.

La radiación solar, de acuerdo al día de la medición 18 de mayo 2017 note la Figura 4.7 tiene la forma de una campana de Gauss con una pérdida de energía manifestada por la radiación difusa en el día de la medición.

Esta forma es característica de días soleados lo cual indica mayor energía por unidad de superficie, donde el valor máximo de radiación solar fue de $1008 \text{ W/m}^2\text{K}$, la temperatura ambiente registrada el día de la medición fue aproximada a 33°C . Esta información fue obtenida de la Estación Meteorológica Nacional (RS_EMAS), proporcionada por la Comisión Nacional del Agua CONAGUA.

4.4 Calculo de energía útil

Conforme a las temperaturas adquiridas, coeficientes convectivos internos e irradiación solar se calcula la energía útil del colector parabólico compuesto. La potencia útil se refiere a la capacidad que tiene un colector de obtuvo a partir de la ecuación (3.9).

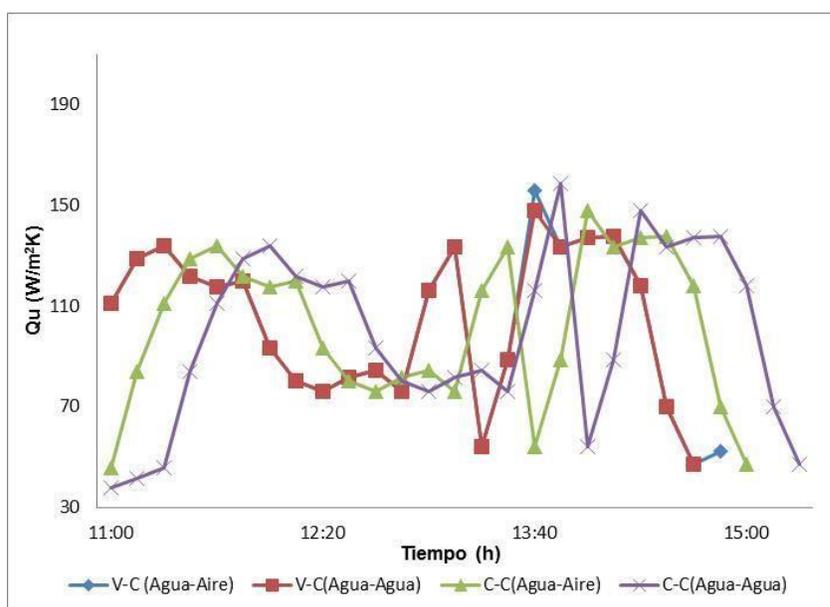


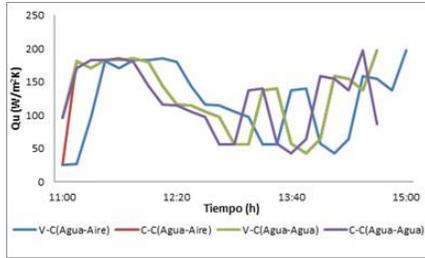
Figura 4.8. Potencia útil de primer sistema.

La mayor ganancia de energía útil en la primer configuración experimental, se obtiene a partir de materiales cobre-cobre con agua como fluido en la interface del absorbedor y cubierta de cobre con un valor $Q_u=158.57 \text{ W/m}^2\text{K}$, como se muestra en la Tabla 4.2 los valores máximos de potencia útil para el sistema 1.

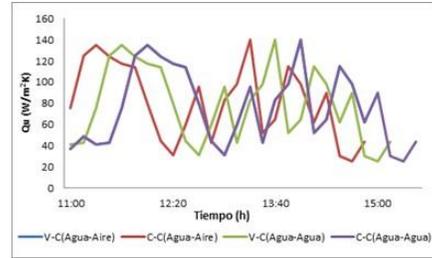
Tabla 4.2. Resumen de potencia útil máxima.

Configuración	Fluido de interfase	$Q_{\max} \text{ W/m}^2\text{K}$
Vidrio-Cobre	Aire	155.7
Cobre-Cobre	Aire	148.2
Vidrio-Cobre	Agua	151.8
Cobre-Cobre	Agua	158.5

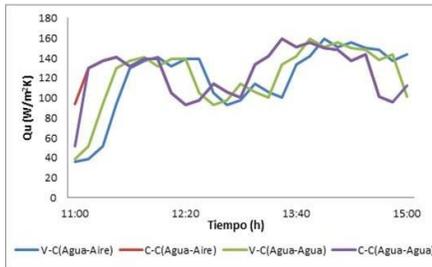
4.4.1 Comportamiento de energía útil en diferentes días.



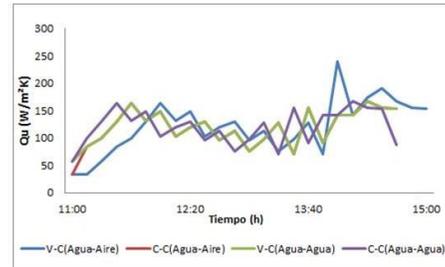
(A)



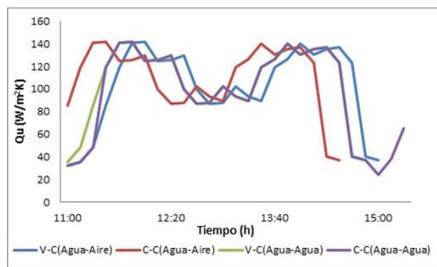
(B)



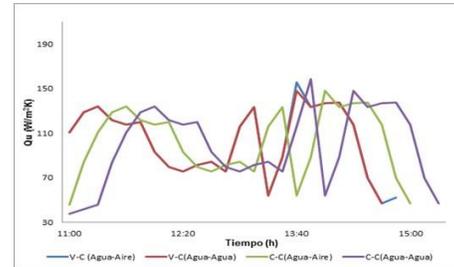
(C)



(D)



(E)



(F)

Figura 4.9. Comportamiento de potencia útil para las pruebas (A) 26 Abr 17, (B) 28 Abr 17, (C) 3 May 17, (D) 16 May 17, (E) 18 May 17, (F) 29 May 17

La Figura 4.9 muestra la diferencia de energía útil entre el vidrio y cobre con los fluidos de agua y aire, si bien el cobre extrae más potencia que el vidrio debido a su conductividad térmica del material, la potencia útil del vidrio es menor comparada con el cobre por lo tanto la potencia transmitida es mayor con fluido de agua. La transferencia de energía es más estable. En la serie del C-C (Agua-Agua) se diferencia de los tres intervalos, la amplitud de las oscilaciones es mucho menor. A demás debido de la pequeña caída de potencia relacionada con la caída de radiación

4.5 Coeficiente radiativo para primer sistema

Los coeficientes de transferencia de calor por radiación fueron obtenidos a partir de la ecuación (3.15) donde se estima el coeficiente radiativo del receptor a la cubierta de vidrio o cobre.

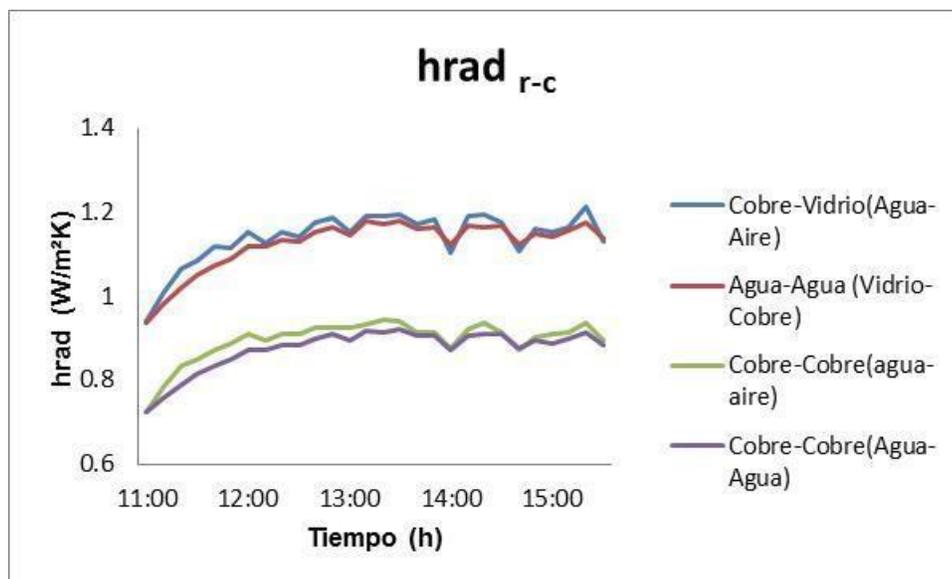


Figura 4.10. Coeficiente radiativo para primer sistema.

Los datos obtenidos en la Figura 3.10 de h_{rad} del receptor a la cubierta, es mayor con cubierta de vidrio, de acuerdo con el concepto de coeficiente radiativo; se originaron mayores pérdidas con cobre como material de trabajo, los valores de agua y aire fueron similares con sus respectivos materiales. En el caso del vidrio arrojaron valores más altos, lo que indica que existen pérdidas mínimas comparándolo con el cobre que de igual modo presenta una proximidad con agua y aire.

4.6 Análisis térmico para cálculo de transferencia neta de calor

El cálculo de transferencia de calor se llevó a cabo bajo las mismas bajo los mismos datos experimentales y de radiación. La Figura 4.9 describe la transferencia que llega al tubo receptor, apartir de su área de apertura A_a y recibe la radiación solar a una tasa Q^+ , la transferencia neta de calor Q_+ es proporcional al área del colector A_a y el factor de proporcionalidad q_+ (W/m^2) que varía con la posición geográfica en la tierra, la orientación del colector, condiciones meteorológicas y la hora del día. Se asume que q_+ es constante y el sistema se encuentra en estado estacionario (Kalogirou S., 2004)

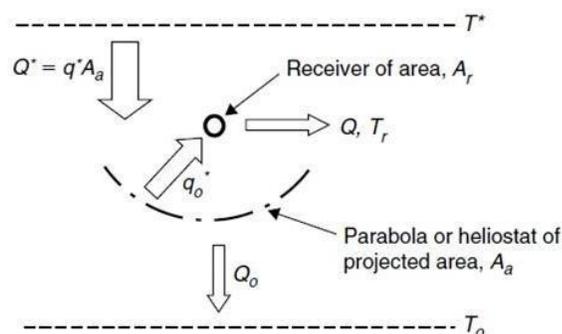


Figura 4.11. Modelo del colector de concentrador de imagen (Kalogirou S., 2004).

Otra ecuación para evaluar el calor útil depende de la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo al colector y del flujo másico que circula a través del colector. Donde Q es la velocidad de la transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control. La anterior es la forma de relación de balance de energía que se usará con la mayor frecuencia para los sistemas de flujo estacionario. (Duffie & Beckham, 2006) Los parámetros en ambos lados de la Ecuación (3) fueron medidos durante las pruebas experimentales, excepto el C_p del tubo.

(4.1)

$$Q = mC_p\Delta T$$

Dónde: m es la masa (Kg), C_p el calor específico del agua (KJ/Kg°C) y ΔT diferencial de temperatura (°C).

4.7 Análisis térmico en estado estacionario

Bajo condiciones de estado estacionario, el calor útil entregado por un colector solar es igual a la energía absorbida por el fluido de transferencia de calor menos las pérdidas de calor directas e indirectas desde la superficie hacia su alrededor. La energía útil de un colector puede ser obtenida de la siguiente fórmula. La ecuación (4.2) es adaptada para su uso con colectores concentradores:

(4.2)

$$q_0 = Ir\eta_0 A_a - A_r U_L (T_r - T_a)$$

Donde I_r Radiación directa (W/m²K), η_0 Eficiencia óptica, A_a Área del absorbedor(m²), A_r Área del receptor(m²), U_L Coeficiente de pérdidas de transferencia de calor del colector solar, T_r Temperatura del absorbedor(°C), T_a Temperatura Ambiente(°C).

4.8 Resultados de transferencia neta de calor con vidrio y cobre

En la Figura 4.10 se compara el calor de radiación Q_{rad} por la fuente de calor, potencia útil Q_{util} , energía absorbida con aire Q_{aire} y energía absorbida con agua Q_{agua} . Es posible observar que para las relaciones existe una pérdida de calor con respecto a Q_{rad} aproximado a 2000J.

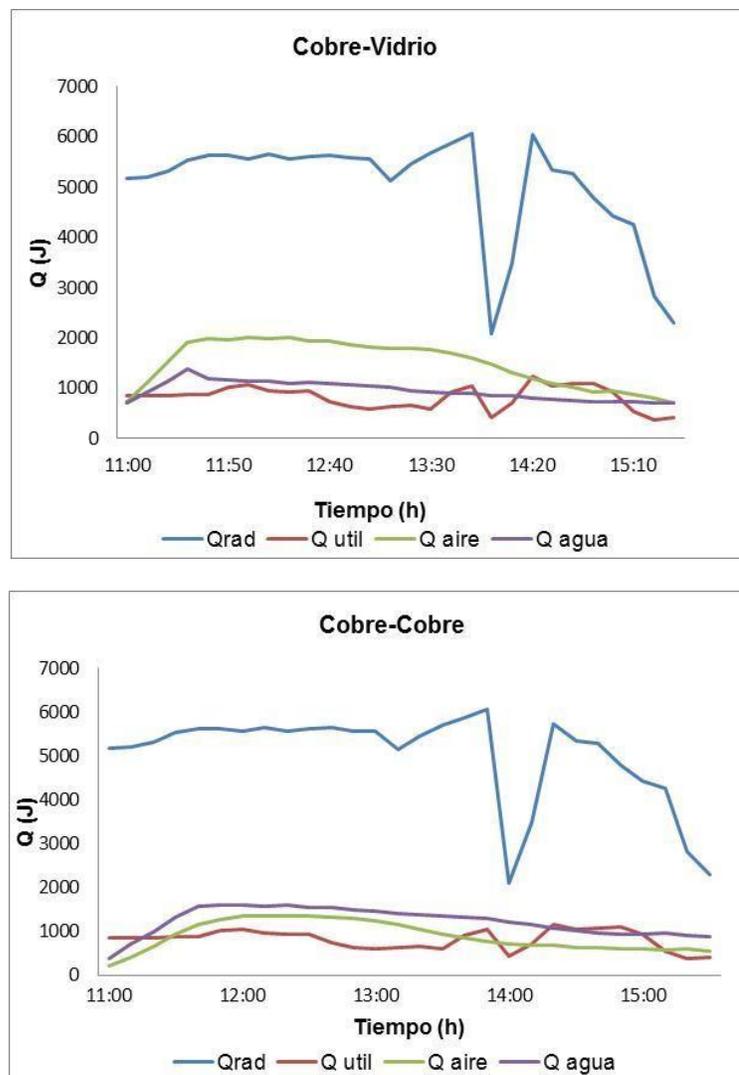


Figura 4.12. Calor entregado por los sistemas de vidrio y cobre.

La línea azul representa el cálculo teórico de la radiación que adquiere el sistema Q_{rad} de la ecuación 4.2 mencionada en este mismo capítulo. El fluido que acumula más energía en un intervalo de tiempo de 5 horas es el aire con cubierta de vidrio, con valor máximo de 2013 J, durante la trayectoria del día tiene una caída repentina con respecto a los demás fluidos como es en el caso del agua que tuvo un Q máximo de 1185J que permanece prácticamente constante. Con cubierta de cobre los valores de Q fueron menores pero muy próximos a los de vidrio. La significativa diferencia de los resultados para ambos sistemas se relaciona con sus temperaturas experimentales, y su potencia útil. La Tabla 4.3 resume los valores de Q promedio para cada cubierta y fluido de trabajo.

Tabla 4.3. Valores de energía del sistema con agua y aire.

Configuración	Q_{rad} J	Q_{aire} J	Q_{agua} J	Q_{util} J
Vidrio-Cobre	5023.8	1496	1385.8	814.4
Cobre-Cobre	5023.8	894	1223.7	812.7

La Tabla 4.4 muestra los resultados de diferentes pruebas experimentales en diferentes días con los mismos fluidos de agua y aire, su Q de radiación varia debido a la irradiación de los días de la medición de este modo se comprueba que el aire tiene mayor Q con cubierta de vidrio, y el cobre con agua.

4.8.1 Análisis de resultados experimentales primer sistema

Tabla 4.4. Valores experimentales

Número de pruebas	Fecha	Grad J	Vidrio-cobre		Cobre-Cobre	
			Qaire J	Qagua J	Qaire J	Qagua J
1	21 abr 17	4822.6	907	851	1057	1223
2	26 abr 17	5401	1468.7	1293.9	998	1232
3	28 abr 17	4822.6	907.5	905.3	807.4	1114
4	3 may 17	4788.85	921.1	813	923.6	1099
5	18 may 17	6068.7	1496	1385.8	894	1223
6	19 may 17	4479	1395.4	627.3	725.7	1249
7	16 may 17	5126	1029	616.7	783.8	585
8	2 may 17	3811	556.1	408	841	1014

Los resultados mostrados en la Tabla 4.4 fueron obtenidos a partir de la ecuación 4.1 para calcular su energía emitida del sistema por tubo y fluido y su potencia útil de la ecuación 3.9. En las configuraciones de vidrio-cobre la mayor energía emitida se da con la configuración vidrio- cobre $Q_{\text{aire}}=1496$ J, lo contrario al usar cobre-cobre ya que sus valores máximos se dan al utilizar agua $Q_{\text{agua}}=1249$ J

4.9 Resultados de segundo diseño experimental

Se analizó en ambos sistemas la temperatura del fluido, comparando el de mayor temperatura. Cuando se trabaja con NaCl a diferentes concentraciones como se muestra en la Figura 4.13 donde la temperatura de máxima solubilidad y el agua varía en 2°C

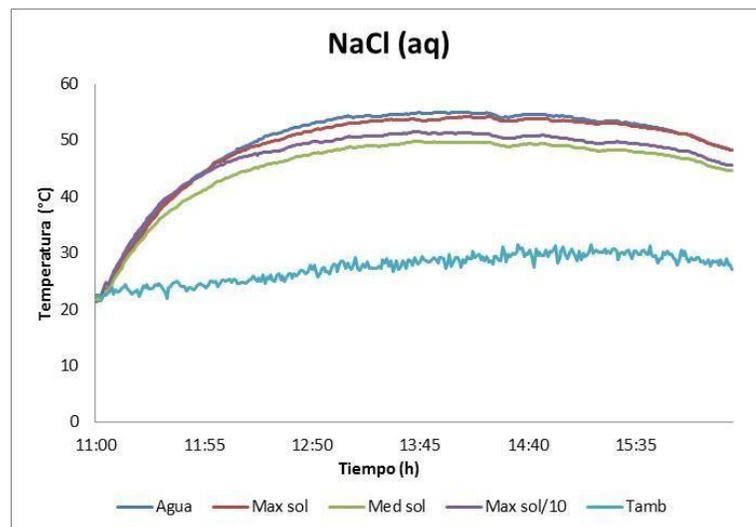


Figura 4.13. Perfil de temperaturas para segundo sistema.

El comportamiento obtenido representado en la Figura 4.13 son las temperaturas aproximadas a los 55°C entre la temperatura del agua y la

solución de Cloruro de Sodio a 3.09 mol, posteriormente entre 0.30 mol y 1.54 mol alcanzan una temperatura de 43 a 45°C.

Se debe tener presente que los potenciales de concentración graficados no mostraron resultados significativos, tampoco fueron susceptibles a la temperatura sometida. Uno de los parámetros de mayor importancia, como ya se mencionó en el Capítulo 2 es a su C_p el NaCl en solución presenta un $C_p \sim 90 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ y $\rho \sim 1.7$ tienen valores muy cercanos respectivamente a su porcentaje.

Debido a que el fluido de menor densidad en este caso, más ligero de 0.3 mol tiende a ascender, mientras por el contrario un fluido de mayor densidad más pesado (3 mol), tiende a descender la densidad de los fluidos es por lo general una función importante de la temperatura, por lo tanto influye en la temperatura obtenida lo que da como resultado la proximidad de las temperaturas.

4.10 Resultados de transferencia neta de calor Cloruro de Sodio.

La utilización de la relación del tiempo experimental, el volumen del fluido de trabajo, su potencia útil y temperatura permite describir la evolución del proceso. A cada una de las soluciones se les hizo la medición de temperatura. Finalmente se graficaron y se analizaron los resultados obtenidos de cada una de la especie presente en solución como se muestra en la Figura 4.14.

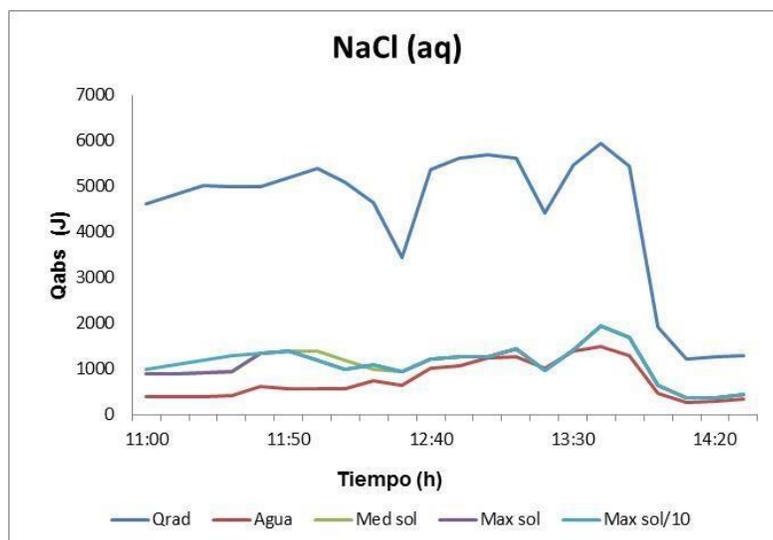


Figura 4.14. Energía de sistema con NaCl a diferentes concentraciones

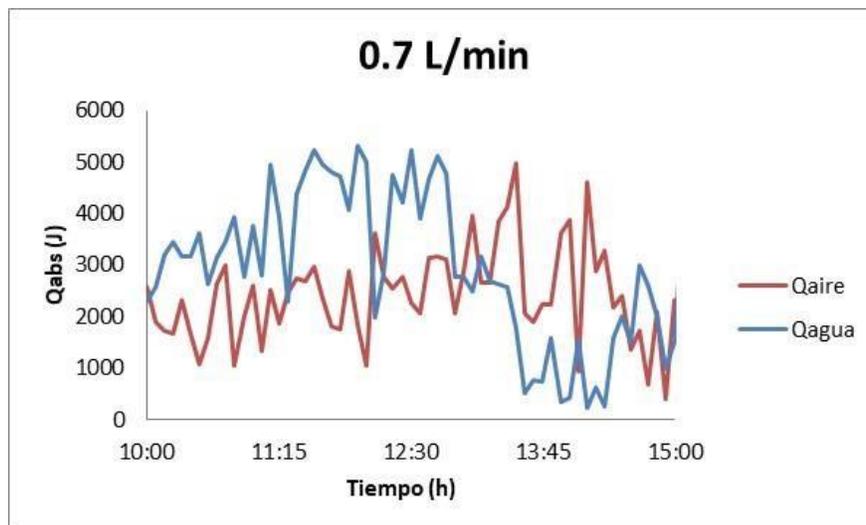
En el segundo sistema los valores de Q están muy cercanos, la evolución energía absorbida se asocia con la evolución de calor específico en función de la temperatura y su concentración molar, donde se tiene una variación mínima con respecto a su incremento de molaridad. De acuerdo con las temperaturas que se registraron en la gráfica 4, los valores de energía absorbida son parecidos que oscilan entre los 2000 J y 1700J.

Las concentraciones del ion Na^+ fueron analizados por la misma metodología del primer sistema. En general se puede decir que la densidad de los líquidos iónicos disminuye a medida que el volumen de los cationes aumenta, la presencia del agua modifica considerablemente la magnitud de la densidad, viscosidad.

Se toma en cuenta que la curvatura que presenta Q_{rad} es debido al valor de su radiación que es proporcionada por la Estación Meteorológica Nacional (RS_EMAS), proporcionada por la Comisión Nacional del Agua CONAGUA.

4.11 Análisis de las temperaturas obtenidas en el CCP en ambos sistemas usando agua.

La finalidad de este concentrador parabólico (CPC) es producir energía térmica a partir de la energía solar concentrada sobre un tubo horizontal por donde fluye agua. El agua es bombeada en supuestas condiciones de entrada permanentes (temperatura, presión, velocidad, flujo másico). Considerando el tamaño del estanque como la capacidad de contener cierta masa de agua, este parámetro tiene gran importancia por cuanto define la capacidad de acumulación de energía. Se simuló el funcionamiento con flujos de 0.7 L/min (0.01 kg/s), 1L/min (0.017kg/s), 2L/min (0.033kg/s), 3L/min (0.05 kg/s). Esta variación de flujo másico tiene un impacto importante en la energía aportada por el sistema mediante el tiempo en transcurso.



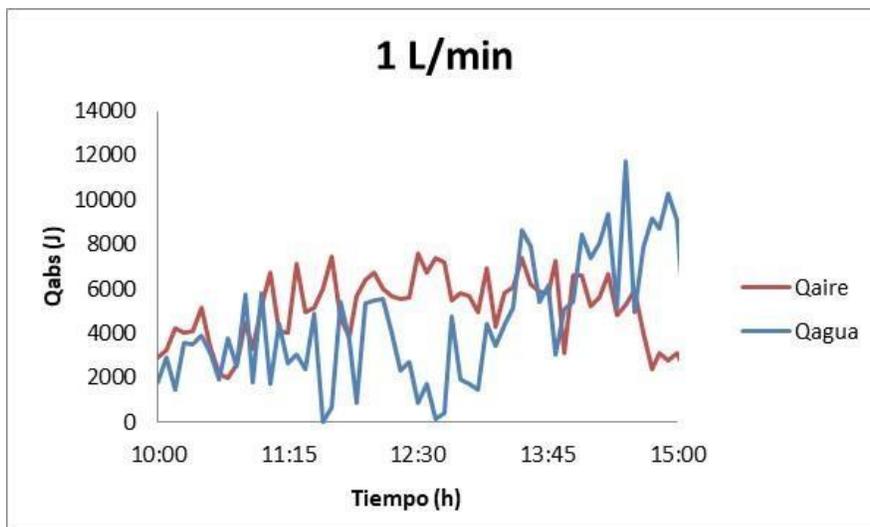


Figura 4.15. Energía absorbida a 0.7 y 1 L/min con aire y agua

La energía que aporta el sistema se obtuvo a partir de la expresión $Q=mCp\Delta T$ para ambos fluidos de trabajo.

En los flujos de menor potencia 0.7L/min y 0.1L/min fue donde se obtuvieron los menores valores de Q, como se puede observar la Figura 4.15. Donde el flujo de agua es de 0.7 L/min se puede notar que para una trayectoria el calor absorbido es mayor para una relación, Q_{aire} representa una energía absorbida prácticamente constante. Cuando Q_{agua} llega a su máximo a las 12 horas, este empieza a disminuir y tiende a cero.

La línea roja Q_{agua} en la gráfica presenta ciertas perturbaciones a medida que pasa el tiempo su Q aumenta exponencialmente. La línea azul Q_{aire} decrece a modo tal que la energía es nula por cuestión de Q_{abs} tuvo el mismo valor.

Q y la presión no se ven afectadas significativamente, si el calentamiento ocurre en ambos flujos cuando el flujo constante del agua es de 2 L/min y para el mismo intervalo de calor suministrado. Al duplicar la relación de llenado se obtuvo una diferencia inferior entre los valores de calor absorbido

presentados por ambas relaciones como se observa en la Figura 4.16. Por lo tanto para un flujo de agua de 2 L/min la relación de energía obtenida solo tendrá influencia sobre la capacidad de transporte de calor. Otro factor que favorece este incremento es el flujo volumétrico.

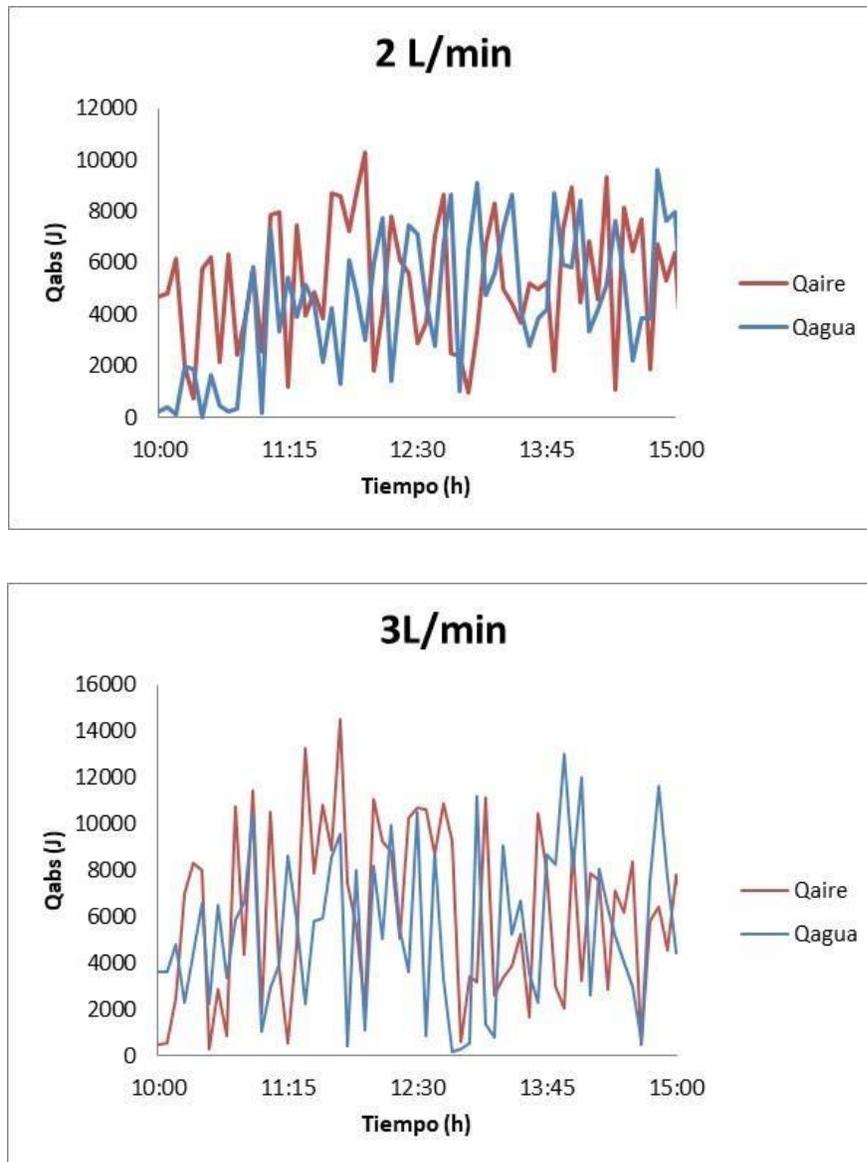


Figura 4.16. Energía absorbida a 2 y 3 L/min con aire y agua.

A partir de los resultados obtenidos para los tres flujos analizados con agua, se observa que la diferencia de calor útil a medida de incremento de flujo del agua disminuye el calor del sistema. Por otro lado, a medida que el flujo másico incrementa la energía absorbida del colector también se aumenta.

La mayor ganancia de energía absorbida se obtuvo con flujo másico de 3 L/min con un Q_{abs} de 14000 J en los periodos de mejor radiación alrededor de las 12 horas, esta característica es típica de flujos turbulentos debido a que se incrementa la velocidad de flujo y a su vez turbulencia favoreciendo la transferencia de calor. El valor más bajo se manifestó con un flujo de 0.7 L/min Q_{abs} 5000J, este comportamiento es común en flujos laminares.

En presencia de agua como fluido de trabajo en la interfase, adquiere una mejor estabilidad cuando flujo másico es menor, por lo tanto entre mayor sea el flujo másico, mayor es la energía que se adquiere.

Es necesario resaltar que los valores de Q absorbida para este tipo de colector no se pueden comparar debido a que no se encuentran reportados en otras investigaciones.

CONCLUSIONES FINALES

Se investigó experimentalmente la influencia de los fluidos de trabajo y su comportamiento térmico en un colector parabólico compuesto. El transporte de calor máximo obtenido por la configuración propuesta fue utilizando

Para la primera configuración del sistema CPC con los tubos de vidrio-cobre el transporte de calor promedio máximo obtenido fue utilizando cubierta de vidrio con aire como fluido con un valor de $Q_{\text{aire}}=1496\text{J}$. En caso de la cubierta de cobre aporta mayor energía con fluido de agua $Q_{\text{agua}}=1223\text{J}$ esto se debe principalmente al hecho de sus coeficientes convectivos que se evalúa en función de sus propiedades físicas del fluido y la temperatura.

En la segunda caracterización se optó por utilizar tubos de vidrio en todo el sistema y cloruro de sodio acuoso a diferentes concentraciones, de acuerdo con los resultados la diferencia de concentraciones no se presentó cambios significativos. Sin embargo a menor concentración se obtiene una ganancia mayor de $Q= 1121.4\text{J}$ a una concentración de 0.30 mol .

De acuerdo con el análisis se concluye que el primer sistema obtuvo mayor ganancia que el segundo sistema, esto puede variar debido a las condiciones climatológicas

En el tercer sistema de canal parabólico de acuerdo con la tendencia de los resultados es posible aseverar que mientras mayor sea el flujo, mayor será la independencia de la relación de llenado. Por lo tanto, para un flujo de agua, mayor a 2 L/min , la relación de llenado solo tendrá influencia sobre la capacidad de transporte de calor, lo que dio como resultado mayor ganancia con flujo de 3L/min .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aramburu, V., Diaz, N., Iriarte, A., & Saravia, L. (2006). CALENTAMIENTO DE AGUA POR CONVECCIÓN NATURAL UTILIZANDO UN CONCENTRADOR SOLAR. PRIMERAS EXPERIENCIAS.

Bejan, A. (1978). Two thermodynamic optima in the design of sensible heat units for energy storage. *ASME, Transactions, Journal of Heat Transfer*, 100, 708-712.

Bejan, A., Kearney, D. W., & Kreith, F. (1981). Second law analysis and synthesis of solar collector systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 103(1), 23-28.

Bellos, E., Korres, D., Tzivanidis, C., & Antonopoulos, K. A. (2016). Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 53-63.

Churchill, S. W. (1983). Comprehensive, theoretically based, correlating equations for free convection from isothermal spheres. *Chemical Engineering Communications*, 24(4-6), 339-352

Donkers, P. A. J., Pel, L., & Adan, O. C. G. (2016). Experimental studies for the cyclability of salt hydrates for thermochemical heat storage. *Journal of Energy Storage*, 5, 25-32.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.

Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1695-1721.

Ge, Z., Ye, F., Cao, H., Leng, G., Qin, Y., & Ding, Y. (2014). Carbonate-salt-based composite materials for medium-and high-temperature thermal energy storage. *Particuology*, 15, 77-81.

Hernández Uribe, G. O. (2017). IEA: Mexico Energy Outlook.

Hossain, M. S., Saidur, R., Fayaz, H., Rahim, N. A., Islam, M. R., Ahamed, J. U., & Rahman, M. M. (2011). Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3801-3812

INCROPERA, F. D. P.(1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ª Edición, Edit.

Jamar, A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 178-187.

Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13), 3187-3196.

Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13), 3187-3196.

Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295.

Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295.

Kalogirou, S. A. (2012). A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*, 48(1), 298-306.

Kestin, J., Khalifa, H. E., & Correia, R. J. (1981). Tables of the dynamic and kinematic viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20–150 C and the pressure range 0.1–35 MPa. *Journal of physical and chemical reference data*, 10(1), 71-88.

Kleiner, F., Posern, K., & Osburg, A. (2017). Thermal conductivity of selected salt hydrates for thermochemical solar heat storage applications measured by the light flash method. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1189-1193.

Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2002). NIST reference fluid thermodynamic and transport properties–REFPROP.

Malato, S., Blanco, J., Alarcón, D. C., Maldonado, M. I., Fernández-Ibáñez, P., & Gernjak, W. (2007). Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors. *Catalysis Today*, 122(1), 137-149.

Malato, S., Blanco, J., Vidal, A., & Richter, C. (2002). Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview. *Applied Catalysis B: Environmental*, 37(1), 1-15.

N'Tsoukpoe, K. E., Schmidt, T., Rammelberg, H. U., Watts, B. A., & Ruck, W. K. (2014). A systematic multi-step screening of numerous salt hydrates for low temperature thermochemical energy storage. *Applied Energy*, 124, 1-16.

Of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*
Perry, R. H. G., MALONEY, D. W., James, O., & ED Robert H Perry, D. W. G. (2001). *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill,.

Pineda Arellano, C. A. (2009). ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE COMPLEJOS FUERTES DE CIANURO EN SOLUCIONES ACUOSAS, USANDO FOTOXIDACIÓN CATALITICA AVANZADA.

Cuernavaca, Morelos

Qiu, Z., Li, P., Li, C., Zhu, Q., Zhang, T., & Wang, C. (2017). A novel design concept for a reflector of parabolic trough concentrator based on pure bending and correction principle. *Solar Energy*, 141, 59-69.

Raithby, G. D., & Hollands, K. G. T. (1975). A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems. *Advances in heat transfer*, 11, 265-315.

Ramírez, M. L., Nieto de Castro, C. A., Fareleira, J. M., & Wakeham, W. A. (1994). Thermal conductivity of aqueous sodium chloride solutions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 39(1), 186-190.

Ramirez Ramos, G.E. (2017). ANALISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN COLECTOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO USANDO TUBO RANURADO. Cuernavaca, Morelos

Rodríguez, S. M., Gálvez, J. B., Rubio, M. M., Ibáñez, P. F., Padilla, D. A., Pereira, M. C.,... & De Oliveira, J. C. (2004). Engineering of solar photocatalytic collectors. *Solar Energy*, 77(5), 513-524.

Sergeev, D., Yazhenskikh, E., Talukder, N., Kobertz, D., Hack, K., & Müller, M. (2016). Thermodynamics of the reciprocal NaCl–KCl–NaNO₃–KNO₃ system. *Calphad*, 53, 97-104

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.

Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538-553.

Trausel, F., De Jong, A. J., & Cuypers, R. (2014). A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage. *Energy Procedia*, 48, 447-452.

Yunus, A. C., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa. *Editorial Mc GrawHill México. Segunda edición. México. DF.*

Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*, 23(3), 251-283.

Zhou W, Lou C, Li Z, Lu L, Yang H. Current status of research on optimum sizing

ÁPENDICE A

Adquisitor de datos AGILENT 34970 A

El adquisitor AGILENT 34970 A se utiliza para monitorear multiples señales (Temperatura, voltaje, etc.).Este adquisitor mide y monitorea una cantidad de datos y puede estar conectado a la computadora.



Tarjeta multiplexora de 20 canales

Para la adquisicion de datos 34970 A es el multiplexor mas versatil para el escaneo de proposito general. Combina conmutacion, multificcion y densidad con velocidades de escaneo de 60 canales para abordar un amplio espectro de adquisicion de datos.



Termopar tipo T

Está formado por un alambre de cobre como conductor positivo y una aleación de 60% de cobre y 40% de Níquel como elemento conductor negativo, se utiliza para medir temperaturas bajo 0°C. Y como límite superior se puede considerar 350°C.



ÁPENDICE B

Tabla de propiedades del aire a la presión de 1 atm

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

ÁPENDICE C

Propiedades de transporte y termodinámicas del agua

Entalpía de agua líquida (NIST, 2002)

Válida para un intervalo de $1 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$

$$H_{\text{LÍQ}} = 4.1876T + 0.0612$$

Entalpía de vapor de agua (NIST, 2002)

Válida para un intervalo de $1 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$

$$H_{\text{VAP}} = 0.0012T^2 + 1.8769T + 2500.5$$

Calor específico (NIST, 2002)

Válida para un intervalo de $0 \leq T \leq 94^\circ\text{C}$ y $P = 614 \text{ mmHg}$ $C_p =$

$$3E^{-9}T^4 - 8E^{-7}T^3 + 7E^{-5}T^2 - 0.0029T + 4.2181$$

Presión (NIST, 2002)

Válida para un intervalo de $1 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$

$$P = 0.0012T^3 - 0.0675T^2 + 2.2528T - 5.9895$$

Densidad del agua líquida (NIST, 2002)

Válida para un intervalo de $1 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$

$$\rho_{\text{LÍQ}} = 0.0035T^2 - 0.0811T + 1000$$

ANEXO1

Constancia de participación en el IIX Congreso de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales (RELACIAM) 2017.



FACULTAD DE INGENIERÍA



AGENDA AMBIENTAL



FACULTAD DEL HÁBITAT



RELACIAM

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
a través de la Facultad de Ingeniería, la Agenda Ambiental
y la Facultad del Hábitat en colaboración con
la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales
Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A: **Nancy Isamar Ortega Mojica**

por la presentación oral de la ponencia:

Evaluación de fluido de trabajo en tubos concéntricos para mejorar la transferencia de calor proveniente de la energía solar

Autor(es): Ortega Mojica, N.I., Ramírez Ramos G.E., Silva Martínez, S., Hernández Pérez, J.A., Huicochea Rodríguez, A.

En el IX Congreso de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales (RELACIAM) llevado a cabo del 2 al 6 de octubre de 2017 en San Luis Potosí, SLP, México

" SIEMPRE AUTÓNOMA. POR MI PATRIA EDUCARÉ "
San Luis Potosí, S.L.P., Octubre de 2017.


Dr. Raúl Morales Segura
Coordinador RELACIAM


Dr. Pedro Medellín Milán
Coordinador de la Agenda Ambiental
Universidad Autónoma de San Luis Potosí


M.I. Jorge Alberto Pérez González
Director de la Facultad de Ingeniería


Dr. Marcos Aigara Siller
Presidente del IX Congreso
RELACIAM UASLP