



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

GENERACIÓN DE VAPOR CON COLECTOR SOLAR BASADO EN
NANOPARTÍCULAS

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

Eder Reyes Cortés



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
CENTRO DE SERVICIOS ESCOLARES
COORDINACIÓN DE EXÁMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión: Salvador Valle Guadarrama, Dr.



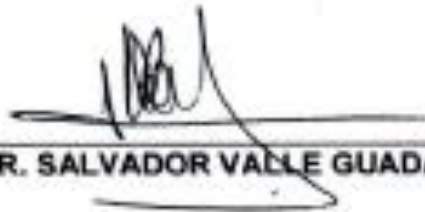
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018.

GENERACIÓN DE VAPOR CON COLECTOR SOLAR BASADO EN NANOPARTÍCULAS

Tesis realizada por **Eder Reyes Cortés** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

DIRECTOR:


DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

ASESOR:


M.C. OMAR RESÉNDIZ CANTERA

ASESOR:


M.I. VICENTE LÓPEZ BAUTISTA

ASESOR:


DR. FEDERICO HAHN SCHLAM

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 La energía solar térmica y colectores solares	4
2.1.1 Energía solar	4
2.1.3 Aprovechamiento de la energía solar.....	7
2.2 Colectores solares	10
2.2.1 Colector parabólico compuesto (CPC)	11
2.3 Generación de vapor con colectores solares	12
2.4 Tecnología de nanopartículas.....	13
2.5 Generación de vapor con nanopartículas metálicas	16
2.6 Generación de vapor con nanopartículas metálicas en colectores solares.....	17
2.7 Limitantes en el uso de nanopartículas	19
2.8 Nanopartículas no metálicas	20
2.9 Literatura citada.....	21
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE COLECCIÓN DE ENERGÍA SOLAR AFECTADO POR RELLENO DE DISTINTA GRANULOMETRÍA	28
3.1 Resumen	28

3.2 Abstract	29
3.3 Introducción	30
3.4 Materiales y métodos	32
3.4.1 Materiales	32
3.4.2 Colector solar parabólico compuesto	32
3.4.3 Área superficial	36
3.4.4 Funcionamiento experimental del CPC	37
3.4.5 Diseño experimental	38
3.4.6 Análisis de datos	38
3.5 Resultados y discusión	39
3.7 Conclusiones	43
3.8 Literatura citada	44
CAPÍTULO 4. SISTEMA DE COLECCIÓN DE ENERGÍA RADIANTE INCORPORADO CON NANOPARTÍCULAS	46
4.1 Resumen	46
4.2 Abstract	47
4.3 Introducción	48
4.4 Materiales y métodos	49
4.4.1 Materiales	49
4.4.2 Colector solar parabólico	49
4.4.3 Organización experimental	52
4.4.4 Tamaño de partícula	52
4.4.5 Estudio de la transferencia de calor	53
4.4.6 Análisis de datos	57
4.5 Resultados y discusión	58
4.5.1 Fluidos de proceso	58

4.5.2 Variación de la temperatura	60
4.5.3 Calor absorbido	66
4.5.4 Temperatura de pared	67
4.5.4 Coeficiente de convección térmica interno	68
4.5.5 Validación de utilidad.....	69
4.5.6 Eficiencia de operación	70
4.5.7 Generación de vapor o agua caliente	71
4.6 Conclusiones.....	72
4.7 Literatura citada	73
CAPITULO 5. CONCLUSIONES GENERALES	76

LISTA DE CUADROS

Capítulo 2.

Página

Cuadro 2.1. Desarrollo e instalación de electricidad solar fotovoltaica en varios países.	8
Cuadro 2.2. Tecnologías adoptadas en procesos industriales.	9
Cuadro 2.3. Tipos de colectores solares	10
Cuadro 2.4. Comparación de los valores de conductividad térmica de temperatura ambiente para sólidos y líquidos.	14

Capítulo 3.

Cuadro 3.1. Identificación de elementos del sistema de colección energía radiante.	48
Cuadro 3.2. Características de distintos rellenos usados en el colector de energía radiante.	51
Cuadro 3.3. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) con valores ($\alpha=0.05$) y valores de F correspondientes al análisis de varianza de la evaluación de la operación del colector parabólico compuesto (CPC) afectado por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación.	53
Cuadro 3.4. Comparación de medias de la operación de un colector parabólico compuesto afectada por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación del sistema.	54

Capítulo 4.

Cuadro 4.1. Notación e identificación de componentes del colector parabólico compuesto.	63
Cuadro 4.2. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) con valores ($\alpha=0.05$) y valores de F correspondientes al análisis de varianza de la evaluación de la operación del colector parabólico compuesto (CPC) afectado por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación.	73
Cuadro 4.3. Comparación de medias de la operación de un colector parabólico compuesto afectada por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación del sistema.	75

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2.	Pagina
Figura 2.1. Sistema de energía típico industrial.	10
 Capítulo 3.	
Figura 3.1. Geometría del CPC.	46
Figura 3.2. Sistema de colección de energía radiante diseñado en SolidWorks®, vista frontal (A), estructura del sistema de colección de energía radiante real (B).	47
Figura 3.3. Vista lateral de estructura de soporte del sistema colector.	47
Figura 3.4. Sistema experimental de colección de energía radiante.	47
Figura 3.5. Sistema de radiación térmica y localización de termopares en el espacio libre entre el CPC y el tubo, ubicación de sistema Arduino (Data logger) y el sistema de iluminación.	48
Figura 3.6. Granulometrias utilizadas dentro del tubo concentrador.	50
Figura 3.7. Variación de la temperatura en función del tiempo del fluido de proceso.	54
 Capítulo 4.	
Figura 4.1. Sistema de colección de energía radiante diseñado en SolidWorks®, vista frontal (A), estructura del sistema de colección de energía radiante real (B).....	63

Figura 4.2. Sistema experimental de colección de energía radiante.	64
Figura 4.3. Sistema de radiación térmica y localización de termopares en el espacio libre entre el CPC y el sistema de iluminación.	64
Figura 4.4. Apariencia de partículas incorporadas en el fluido de proceso del sistema de colección de energía radiante.	73
Figura 4.5. Diámetro de partículas incorporadas al fluido de proceso del sistema de colección de energía radiante.	74
Figura 4.6. Variación de la temperatura en función del tiempo del fluido de proceso.	76
Figura 4.7. Variación de la temperatura alcanzada (A) a 120 min de operación (T_{120}), del calor absorbido hasta esa condición (B), la temperatura de pared (C) y el coeficiente de convección térmica (D), afectados por el ángulo de inclinación del equipo.	78
Figura 4.8. Representación 1:1 entre la temperatura de pared estimada mediante modelado con los datos experimentales evaluados en forma física.	84
Figura 4.9. Área de iluminación en los distintos ángulos de inclinación.	85

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), al Departamento de Ingeniería Mecánica y al Departamento de Ingeniería Agroindustrial por brindarme su infraestructura física y humana para desarrollar satisfactoriamente mis estudios.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por aceptar dirigir este trabajo, su valioso apoyo, su guía y por transmitirme sus conocimientos.

Al M.C. Omar Reséndiz Cantera, al M.I. Vicente López Bautista y al Dr. Federico Hahn Schlam por sus valiosas sugerencias, su apoyo y su siempre amable disposición en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Martín Hidalgo Reyes por su valioso apoyo durante mi permanencia en los estudios de Posgrado.

A mis compañeros de grupo por su apoyo incondicional durante el periodo de estudios de posgrado.

DEDICATORIA

A mi mamá Reyna Cortés López y mi papá Sabino Reyes Gutiérrez quienes me han dado la confianza para alcanzar las metas propuestas y retos que he emprendido, mil gracias.

A mis Hermanos Erick y Edith que me impulsan a seguir adelante en todos mis proyectos.

A mis primos Jimena, Grisél y Rafa que me recuerdan la infinita alegría de ser niño y me inspiran a lograr mis metas.

A mis amigos de la vida, Héctor, Uriel, Mateo, Alejandro, Eliher, Audiel, Román, Blanca, Adieruz, Viviana, Dary, por siempre tener un consejo, un regaño y apoyarme incondicionalmente.

A mis compañeros de grupo de maestría por su amistad y apoyo durante nuestra estancia en el IAU.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor es originario del estado de México, México, nació el 03 de junio de 1991 en el municipio de Lerma. Cursó sus estudios de nivel medio superior en la Escuela Preparatoria Oficial número 38 en Lerma Edo. de México. Generación 2006-2009. Realizó sus estudios de Licenciatura en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Generación 2009-2014. Obteniendo el título de Ingeniero Agroindustrial con la tesis titulada: “Elaboración e implementación de manual de buenas prácticas de manufactura y procesos de operación estándar en una planta de panificación semi-mecanizada en Zapopán, Jalisco, México.”. Profesionalmente ha trabajado como evaluador de programas de la CONAFOR en 2014, 2015 y 2016. En el año 2015 inicia un proyecto de producción de micelio y hongos comestibles en Texcoco, Edo. de México. En el año 2016 ingresó al programa de maestría de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, enfocándose en la investigación generación de vapor con colector solar basado en nanopartículas

RESUMEN GENERAL

GENERACIÓN DE VAPOR CON COLECTOR SOLAR BASADO EN NANOPARTÍCULAS¹

La demanda energética mundial ha crecido con el aumento demográfico en décadas recientes, el agotamiento de fuentes de energía fósiles ha generado la búsqueda de alternativas sustentables e innovadoras de fuentes de energía. Es por ello que se desarrolló la siguiente investigación en la cual se utiliza un colector parabólico compuesto (CPC) como sistema de captación de energía. Se presentan los resultados obtenidos de los fluidos de trabajo evaluados, en un primer experimento se colocó un sinfín de acero galvanizado dentro del concentrador, balines de acero Bbs (4.5 mm), balines de cobre (4.5 mm) y rebabas de cobre, en un segundo experimento se adicionaron nanopartículas de plata, nanopartículas de cobre, tinta china y carbón activado en una concentración de 0.05 % de la masa total del fluido, utilizando agua pura como testigo en ambos experimentos. Los resultados obtenidos de acuerdo a los factores de análisis, ángulo de inclinación del sistema colector con cuatro niveles (30, 35, 40 y 45°) y el fluido de trabajo, siendo las variables respuesta, la temperatura alcanzada a los 120 min (T_{120}), calor absorbido (Q_{abs}), temperatura de pared (T_p) y el coeficiente convectivo interno (h_i), se sometieron a análisis de varianza y a pruebas de comparación de medias de tratamiento mediante el estadístico de Tukey con nivel de significancia de 0.05. En el primer experimento el mejor tratamiento es el fluido adicionado con rebabas de cobre el cual registro (T_{120}) de 86.52 °C, (Q_{abs}) de 67.89 J, (T_p) de 100 °C y (h_i) de 11.95 W/m² °C, con un ángulo de inclinación de 30 grados. En el segundo experimento el tratamiento con nanopartículas de plata obtuvo los mejores resultados, siendo (T_{120}) de 85.67 °C, (Q_{abs}) de 66.6 J, (T_p) de 97 °C y (h_i) de 5.24 W/m² °C, con un ángulo de inclinación de 30°.

Palabras clave: colector de energía radiante, nanopartículas, coeficientes de transferencia de calor.

Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Departamentos de Irrigación e Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Autor: Eder Reyes Cortés

Director de Tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

GENERAL ABSTRACT

STEAM GENERATION WITH SOLAR COLLECTOR BASED ON NANOPARTICLES²

Global energy demand has grown with demographic growth in recent decades, the depletion of fossil energy sources has led to the search for sustainable and innovative alternatives to energy sources. This is why the following research was carried out in which a composite parabolic collector (CPC) was used as an energy capture system. The results obtained from the evaluated working fluids are presented, in a first experiment a galvanized steel auger was placed inside the concentrator, Bbs steel pellets (4.5 mm), copper pellets (4.5 mm) and copper burrs, in a second experiment, silver nanoparticles, copper nanoparticles, chinese ink and activated charcoal were added in a concentration of 0.05% of the total fluid mass, using pure water as a witness in both experiments. The results obtained according to the factors of analysis angle of inclination of the collector system with four levels (30, 35, 40 and 45 °) and the working fluid, being the variables response, the temperature reached to the 120 min (T_{120}), absorbed Heat (Q_{abs}), Wall temperature (T_p) and the internal convective coefficient (h_i), were subjected to analysis of variance and comparison tests of treatment means by Tukey's statistician with a significance level of 0.05. In the first experiment, the best treatment is the fluid added with copper burrs which register (T_{120}) of 86.5 °C, (Q_{abs}) of 67.89 J, (T_p) of 100 °C and (h_i) of 11.95 W/m² °C, with a tilt angle of 30°. In the second experiment, the treatment with silver nanoparticles obtained the best results, being (T_{120}) of 85.67 °C, (Q_{abs}) of 66.6 J, (T_p) of 97 °C and (h_i) of 5.24 W/m² °C, with a tilt angle of 30°.

Key words: radiant energy collector, nanoparticles, heat transfer coefficients

Thesis of Master Science, Program of Agricultural Engineering and Integral Use of Water. Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Author: Eder Reyes Cortés

Thesis Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La demanda mundial de energía está creciendo rápidamente debido a la explosión demográfica y los avances tecnológicos. Por ello, es importante buscar una fuente de energía renovable confiable, rentable y duradera para la demanda de energía que surja en el futuro (Kannan & Vakeesan, 2016). Existen numerosas aplicaciones que pueden utilizar la energía solar para cubrir total o parcialmente las necesidades energéticas. En niveles de baja temperatura, la calefacción de espacios y la producción de agua caliente doméstica son las aplicaciones más importantes donde se puede utilizar la irradiación solar (Tzivanidis, Bellos, Korres, Antonopoulos, & Mitsopoulos, 2015). En niveles de temperatura media, el enfriamiento con energía solar (E Bellos, Tzivanidis, Antonopoulos, & Gkinis, 2016), la desalinización (Fouda, Elwakil, Radwan, & Allagui, 2016) y el calor en procesos industriales (Chafie et al., 2016) son aplicaciones que pueden explotar la energía solar, principalmente con colectores de alta eficiencia como colectores parabólicos. Para niveles de temperatura alta, las plantas de concentración de energía solar son sistemas que atraen mayor investigación en todo el mundo (Zhang et al., 2016).

Los colectores solares son los sistemas que capturan la energía solar y la transforman parcialmente en energía térmica útil. Los colectores solares convencionales son colectores de placa plana que operan generalmente en niveles de temperatura de hasta 100 ° C (Bellos et al., 2016). Se pueden lograr niveles de temperatura más altos hasta de 200 °C con los colectores de tubos al vacío (Kalogirou, 2004), mientras que, para temperaturas más altas, la única solución posible es la de los colectores solares concentradores (Zhou, Zhang, Zuo, Huang, & Zhang, 2015). Los colectores cilindro parabólicos, los colectores

parabólicos compuestos, los colectores lineales de Fresnel, las torres solares y los colectores solares de placas son los sistemas solares de concentración más conocidos (Yanjuan Wang, Xu, Liu, Chen, & Liu, 2016) y los colectores parabólicos son la tecnología más eficiente entre los colectores mencionados anteriormente (Tzivanidis et al., 2015).

El empleo de la energía solar para la producción de vapor es un área en creciente desarrollo debido a que ésta es una fuente de energía abundante, limpia y renovable (Huang, Yu, Li, & Tao, 2015). Actualmente la producción de vapor utilizando energía solar (ya sea con colectores solares o con sistemas de torres solares), se basa en calentar un fluido hasta su punto de ebullición en concentraciones ópticas (superficiales) bajas, generando una alta temperatura (Bae et al., 2015). El rendimiento térmico de los colectores cilindro parabólicos (PTC) se puede mejorar suspendiendo nanopartículas en los fluidos de transferencia de calor utilizados tradicionalmente (Allouhi et al., 2017).

El uso de nanofluidos como fluidos de trabajo es una de las tecnologías más prometedoras para aumentar el rendimiento térmico de los colectores solares (Mwesigye, Huan, & Meyer, 2015). Los nanodifluidos se crean mezclando los fluidos de trabajo habituales, como agua o aceite térmico, con nanopartículas que generalmente son metálicas. Las nanopartículas más usuales son Al_2O_3 , CuO , Cu , Al , Fe , TiO_2 y SiO_2 (Ham et al., 2016).

En la actualidad, debido a sus excelentes propiedades térmicas, mecánicas y ópticas (Sidik, Samion, Ghaderian, & Yazid, 2017) los materiales de carbono también han sido investigados para la captación de energía solar, como el nanotubo de carbono (Manasrah et al., 2016) y el grafeno (Khosrojerdi, Lavasani, & Vakili, 2017). Sin embargo, dichos materiales son de alto costo y requieren un proceso de preparación complejo, lo que dificulta su amplia aplicación en la práctica (Mesgari et al., 2016). Las nanopartículas de negro de carbono pueden ser una alternativa por su bajo costo y amplia disponibilidad (Wang et al., 2018).

Evidencias muestran que la tinta china podría usarse como disolvente y dispersante para preparar materiales compuestos por nanotubos de carbono de paredes múltiples y alcohol polivinílico (Yan, Dasari, & Kong, 2014). Por lo tanto, la tinta china es estable y puede ser un material ideal para la recolección de energía solar (Wang et al., 2018). Si bien la aplicación de un colector de energía radiante está dirigida al aprovechamiento de la energía solar, la evaluación de este tipo de sistemas puede realizarse en forma más controlada si se usa una fuente de emisión constante de radiación térmica. El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de evaluar el efecto de incorporar partículas de diferente granulometría en el fluido de proceso en un colector parabólico compuesto (CPC) sobre la capacidad de colección de energía radiante de este tipo de sistemas. Asimismo, se plantearon los siguientes objetivos particulares: evaluar el efecto del área superficial de un relleno en el sistema de colección de energía sobre la variación de temperatura de un fluido de trabajo en un colector parabólico compuesto y evaluar la transferencia de calor y los coeficientes de convección térmica en un colector parabólico compuesto incorporado con partículas de distinta granulometría. La hipótesis que se planteó en la investigación es que con la incorporación de partículas en el orden de los nanómetros el aumento de la temperatura del fluido de trabajo en el CPC se puede lograr en un tiempo menor en comparación con una situación que utiliza agua pura, como convencionalmente se realiza.

La presente tesis está organizada en cinco capítulos, en el primer capítulo se presenta una introducción general del trabajo de investigación así como sus alcances, el capítulo dos contiene una revisión bibliográfica de la investigación, el capítulo 3 presenta un ensayo exploratorio con granulometrías macro para mejorar la eficiencia del CPC, el capítulo cuatro presenta un estudio completo con nanopartículas donde se calculó eficiencia del CPC, coeficientes convectivos, calor absorbido y análisis de utilidad del sistema, por último el capítulo cinco se redactan conclusiones generales de la tesis.

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La energía solar térmica y colectores solares

2.1.1 Energía solar

A principios del siglo XIX el 95 % de la energía primaria que se consumía en el mundo procedía de fuentes renovables. Un siglo después tal porcentaje era del 38 %, y a principios del presente siglo era sólo del 16 % (Fouquet, 2013). A la energía solar a menudo se llama "energía alternativa" a las fuentes de energía de origen fósil como las derivadas del petróleo y el carbón (Hasnain, 1998). El sol irradia una gran cantidad de energía que ha hecho posible la vida en nuestro planeta y a través del tiempo, con transformaciones biológicas y químicas es como esta energía se ha almacenado en el petróleo. Este último combustible ha permitido el actual desarrollo de la humanidad. Por otro lado, el agotamiento de los hidrocarburos es un hecho al que muy pronto tendremos que enfrentarnos. El uso directo de la energía solar es una de las posibilidades para que el Sol continúe siendo proveedor de energía en el actual desarrollo tecnológico (Tapia & Del Rio, 2009).

La energía solar es un tipo de energía con un gran potencial en el futuro, incluso aunque en la actualidad solo cubre una pequeña parte de la demanda energética global (0.05% del suministro total de energía primaria); actualmente la energía fotovoltaica genera menos del 1% del suministro total de electricidad (Espinosa & Alexandra, 2013). Esto se debe a que la energía solar todavía se considera la más costosa de las energías renovables. Sin embargo, en regiones remotas de la tierra se puede constituir la mejor solución actual para un sistema descentralizado suministro de energía (Vargas & Danitza, 2016). De acuerdo con

el estudio de BP Statistical Energy 2010, la capacidad acumulada de energía en el mundo era 22928,9 MW en 2009, un cambio del 46,9% en comparación con 2008 (Solangi, Islam, Saidur, Rahim, & Fayaz, 2011).

La energía solar es un recurso ambientalmente ventajoso en comparación con cualquier otra fuente de energía, y el eje de cualquier programa serio de desarrollo sostenible. No agota los recursos naturales, no causa CO₂ u otras emisiones gaseosas en el aire ni productos de desecho líquidos o sólidos. Con respecto a un desarrollo sostenible, las principales ventajas derivadas directa o indirectamente de la energía solar son los siguientes (Solangi et al., 2011).

- Sin emisiones de invernadero (principalmente CO₂, NO_x) o gases tóxicos (SO₂, partículas);
- Recuperación de tierras degradadas;
- Reducción de líneas de transmisión de redes eléctricas;
- Mejora la calidad de los recursos hídricos;
- Aumento de la independencia energética regional / nacional;
- Diversificación y seguridad del suministro de energía;
- Aceleración de la electrificación rural en los países en desarrollo.

2.1.2 Energía solar térmica

La reacción de fusión nuclear que ocurre continuamente en el núcleo del sol libera una gran cantidad de radiación solar hacia la tierra. Según algunas estimaciones, el potencial anual de energía solar es aproximadamente entre 1,575 y 49,837 EJ. Esto es más alto que el suministro total de “energía primaria” anual del mundo para el año 2014 reportado por IEA de 573 EJ ("IEA bioenergy update," 2018). Por lo tanto, se puede decir que, si se aprovecha por completo la energía solar, se puede satisfacer la demanda total de energía en el mundo. Claramente el potencial de energía solar es severamente subutilizado (Oyedepo, 2012). Actualmente se estima que el sol continuara proporcionando energía solar

durante 4 mil millones de años y, por lo tanto, es una fuente de energía sostenible y renovable(Chu & Majumdar, 2012). Durante condiciones de cielo despejado, la radiación solar emitida por el sol está disponible en la superficie de la tierra a una intensidad aproximada de 1000 W m^{-2} . Esta intensidad es suficiente para satisfacer la energía térmica necesaria para aplicaciones térmicas básicas como el suministro de agua caliente(Pinzón, Corral, Nájera, & Campos, 2016). Para aplicaciones de alta temperatura la radiación solar debe ser concentrada utilizando reflectores adecuados. Para generación de electricidad a partir de radiación solar se puede lograr a través de células fotovoltaicas (PV) o mediante una planta de energía solar (CSP). Su naturaleza intermitente y falta de disponibilidad durante bastantes horas del día requiere la necesidad de sistemas de almacenamiento de energía (TES)(Kannan & Vakeesan, 2016). Los TES pueden ser en comparación con la tecnología de almacenamiento de electricidad a base de batería como abajo (Alva, Lin, & Fang, 2017).

1. Cuando la fuente de energía que se almacenará es de baja energía eléctrica, el TES tiene una eficiencia balanceada en el rango de 50-100%. El TES es la tecnología de almacenamiento más adecuada para algunas aplicaciones térmicas como plantas de generación de electricidad o planta de energía con una concentración solar (CSP) o un reactor nuclear (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015).
2. Cuando la fuente de energía que se almacenará es de alta calidad eléctrica, el almacenamiento de la batería tiene una eficiencia en el rango de 80-100%. El TES no es muy adecuado para una sola red de almacenamiento de energía de fuentes tales como eólica o fotovoltaica (Luo et al., 2015). Aunque el TES también puede almacenar electricidad en la red, pero la eficiencia de ida y vuelta de este proceso estaría muy por debajo del 50% (Tie & Tan, 2013).
3. A diferencia de las tecnologías de baterías, el rendimiento de los TES no típicamente experimenta una degradación cíclica y el TES tiene un ciclo de vida mejor (Luo et al., 2015).

4. El TES típicamente usa materiales abundantes con toxicidades limitadas (Tie & Tan, 2013).

Se puede afirmar que la energía solar térmica es la conversión de la radiación solar en calor. Entre los sistemas de energía renovables, la energía solar térmica es considerada como la alternativa más económica (Kalogirou, 2004). Por lo tanto, los sistemas de almacenamiento de energía deben estar asociados con la captura de energía solar para cubrir las necesidades energéticas (Esence, Bruch, Molina, Stutz, & Fourmigué, 2017). El almacenamiento de calor sensible consiste en acumular energía térmica en un medio sólido o líquido cuya temperatura posteriormente se elevará para obtener un aumento de temperatura requerida, una eficiente capacidad de transferencia calor de un material dará como resultado una mayor cantidad de energía almacenada (Fernández-García, Zarza, Valenzuela, & Pérez, 2010). Por lo general, los sistemas utilizan colectores y concentradores solares para recoger la radiación solar, almacenarla y utilizarla para calentar el aire o el agua en plantas domésticas, comerciales o industriales (Kalogirou, 2004).

2.1.3 Aprovechamiento de la energía solar

Entre todas las fuentes de energía renovable, la energía solar atrae una particular atención como una de las opciones más prometedoras para ser aplicadas en industrias (Schnitzer, Brunner, & Gwehenberger, 2007). Algunas de las aplicaciones más comunes. Son procesos de agua caliente, vapor, secado y deshidratación, precalentamiento, Concentración, pasteurización, esterilización, lavado, limpieza, Reacciones químicas, calefacción de espacios industriales, alimentos, plásticos, construcción, industria textil e incluso negocios (Muneer, Maubleu, & Asif, 2006).

La tecnología solar fotovoltaica aprovecha la energía del sol que proporciona en grandes cantidades, es segura y ambientalmente amigable en la generación de electricidad, en 2005, los mercados solares mundiales alcanzaron US \$ 11.8 mil

millones, un aumento del 55% en comparación a 2004 (Makrides et al., 2010). El cuadro 2.1, muestra el desarrollo esperado y la instalación de energía solar fotovoltaica para generar electricidad en los EE. UU., Europa, Japón y en todo el mundo hasta 2030 (Ellabban et al., 2014).

Cuadro 2.1. Desarrollo e instalación de electricidad solar fotovoltaica en varios países.

Año	USA (Mw)	Europa (Mw)	Japón (Mw)	Resto Del Mundo (Mw)
2000	140	150	250	1,000
2010	3,000	3,000	5,000	14,000
2020	15,000	15,000	30,000	70,000
2030	25,000	30,000	72,000	140,000

Un sistema de energía industrial típico se compone de 4 partes principales; Suministro de energía, planta de producción, recuperación de energía y sistemas de refrigeración. La figura 2.1, muestra un diagrama de un sistema de energía típico industrial.

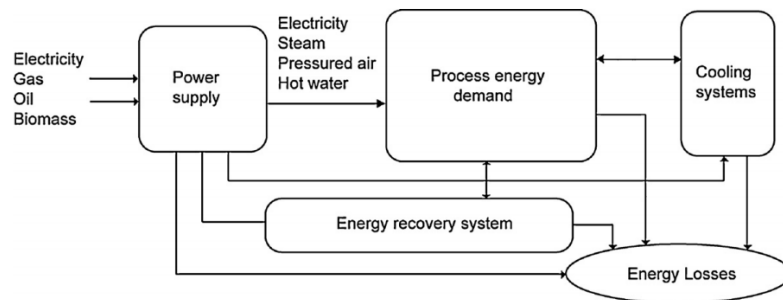


Figura 2.2. Sistema de energía típico industrial (Ellabban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014).

La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para operar el sistema esta es principalmente a partir de energía eléctrica, calor, gas, vapor o carbón. La energía se utiliza en esta parte para ejecutar Subsistemas, solenoides

de presión / vacío / temperatura, válvulas e interruptores. Los sistemas de energía solar pueden ser aplicados para generar potencia energética. El cuadro 2.2, muestra aplicaciones de energía solar y las tecnologías adoptadas en procesos industriales.

Cuadro 2.2. Tecnologías adoptadas en procesos industriales.

Energía solar	Tecnología del sistema de captación solar	Tipo de sistema
SWH	Sistema Thermo Sifón	Pasivo
	Colector integrado de almacenamiento	Pasivo
	Circulación directa	Activo
	Sistemas de calentamiento indirecto de agua	Activo
	Sistemas de aire	Activo
Calefacción y enfriamiento de espacios	Calefacción de espacios y servicio de agua caliente.	Activo
	Sistema de aire	Activo
	Sistemas de agua	Activo
	Sistemas de bomba de calor	Activo
	Sistemas de absorción	Activo
	Refrigeración por adsorción (deseccante)	Activo
	Sistema mecánico	
Refrigeración solar	Unidades de adsorción	Activo
	Unidades de absorción	Activo
Refrigeración solar	Unidades de adsorción	Activo
	Unidades de absorción	Activo
Procesos industriales que necesitan calor	Sistemas industriales de aire y agua.	Activo
	Sistemas de generación de vapor	Activo
Desalinización solar	Alambiques solares	Pasivo
	Flash multietapa (MSF)	Activo
	Evaporador de efecto múltiple (MEB)	Activo
	Compresión de vapor (VC)	Activo
Sistemas de energía solar térmica	Colectores cilíndrico parabólicos	Activo
	Sistemas de torre parabólica	Activo
	Sistemas de platos parabólicos	Activo
	Hornos solares	Activo
	Sistemas de química solar	Activo

2.2 Colectores solares

Para aumentar la eficiencia de los sistemas térmicos solares, se aplican colectores solares para calentar el aire o el agua como medio de transferencia de calor. Sin embargo, cada colector está dedicado para una aplicación específica. Por ejemplo, los colectores de placa plana están diseñados adecuadamente para ser usados en aplicaciones de baja temperatura, los colectores de concentración y de seguimiento solar cilindro-parabólicos (CCP) son adecuados para aplicaciones de alta temperatura en las que el sistema alcanza una temperatura superior a 250 °C con alta eficiencia, Los colectores de seguimiento de dos ejes se aplican en los generadores de potencia (sin seguimiento) y los PTC de un eje se utilizan principalmente en procesos de calor industriales. Entre los colectores, los colectores móviles requieren mayor costo de mantenimiento en comparación con otros colectores. El Cuadro 2 ilustra las tres principales categorías y tipos de colectores solares actualmente utilizados (Kalogirou, 2004). El Cuadro 2.3 ilustra las tres principales categorías y tipos de colectores solares actualmente utilizados.

Cuadro 2.1. Tipos de colectores solares (Kalogirou, 2014).

Seguimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	Radio de concentración	Rango de temp. (°C)
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubo evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
Un eje	Parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	70-240
		Tubular	5-15	70-290
	Reflectores Fresnel (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Cilindro parabólico (PTC)	Tubular	15-45	70-290
	Cilíndrico (CTC)	Tubular	10-50	70-290
En dos ejes	Disco parabólico (PDR)	Focal	100-1000	100-500
	Heliostato	Focal	100-1500	150-2000
	Horno solar	focal	1500-5000	600-3000

Hasta ahora, se han hecho muchos intentos para extraer la energía solar mediante colectores solares, seguidores solares y espejos gigantes con el fin de utilizarlo para fines industriales. Las aplicaciones de energía solar en la industria se dividen en 2 categorías principales: la energía solar térmica y la fotovoltaica (Armaroli & Balzani, 2016).

2.2.1 Colector parabólico compuesto (CPC)

La radiación solar es una energía de alta temperatura y exergía, su fuente de origen, es el Sol, su irradiancia es de alrededor de $63 \text{ MW} / \text{m}^2$. Sin embargo, la geometría de sol-Tierra disminuye drásticamente el flujo de energía alrededor de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ en la superficie de la Tierra (Mathew, Visavale, & Mali, 2016). Sin embargo, con un alto flujo solar, esta desventaja puede ser superada mediante el uso de sistemas solares de concentración que transforman energía solar en otro tipo de energía (generalmente térmica). La radiación solar se convierte en energía térmica en el foco de sistemas de concentración solar térmica. Estos sistemas están clasificados por su geometría de enfoque como concentradores de enfoque puntual (sistemas de receptor central y platos parabólicos) o concentradores de línea focal (colectores cilindro-parabólicos (CCP) y colectores lineales de Fresnel) (Fernández-García et al., 2010).

Los colectores solares convencionales son colectores de placa plana que operan generalmente en bajos niveles de temperatura hasta 100°C (E Bellos et al., 2016). Niveles de temperatura más altos de hasta 200°C se puede lograr con colectores de tubo de vacío (Kalogirou, 2004) mientras que para mayores temperaturas la única solución posible son los colectores solares concentradores (Zhou et al., 2015). Colectores cilindro parabólicos, compuesto, colectores parabólicos, colectores lineales Fresnel, torres solares y colectores de platos solares han mostrado una gran eficiencia térmica (Qiu, He, Cheng, & Wang, 2015; Y Wang, Quan, & Tay, 2015).

Dentro de los usos de la energía solar los sistemas de concentración son una de las tecnologías más usadas y el concentrador parabólico compuesto (CPC) es una posibilidad muy prometedora. La idea del CPC tiene un poco más de 40 años, fue concebido simultáneamente en 1966 en Estados Unidos de Norteamérica por (Winston & Hinterberger, 1975), en Alemania en 1966 por Ploke (1966), y en la URSS por (Baranov & Melnikov, 1966). En 1974 Winston (1974) describió el CPC en 2D, mostrando las ventajas de este tipo de concentrador, como un concentrador de no imagen, para ser usado en dispositivos solares, y también mostró que el CPC tiene la máxima concentración posible. (Rabl, 1976), analizó las propiedades ópticas y térmicas del CPC. En ese trabajo Rabl presentó también el desempeño de un CPC en 2D truncado, y en el mismo trabajo desarrolló una descripción paramétrica del CPC en 2D en coordenadas cartesianas. En 1981 Rapp (1981) desarrolló el CPC utilizando una descripción matemática basada en geometría analítica y, a través de ésta, obtuvo los parámetros geométricos importantes para diseño del CPC. En ese trabajo se muestran las relaciones de transformación entre coordenadas polares y cartesianas, sin embargo, no realizó la etapa de encontrar la descripción analítica del CPC en coordenadas cartesianas, sino que obtuvo los parámetros del CPC, para luego usarlos en el diseño. En 1989 (Bassett, Welford, & Winston, 1989) mostraron las ecuaciones paramétricas del CPC en 2D y 3D, y una relación implícita que representa el CPC en 3D. También en 1989 Miñano (1989) analizó el CPC usando coordenadas cartesianas en 2D y 3D y obtuvo expresiones implícitas. En 1990 (Suresh, O'Gallagher, & Winston, 1990), realizaron una evaluación del desempeño térmico y óptico del CPC. En el 2005 Winston y colaboradores hicieron una revisión de los trabajos sobre los concentradores de no imagen para los CPC en 2D y 3D donde nuevamente se enfatizan los resultados en coordenadas polares.

2.3 Generación de vapor con colectores solares

La producción de vapor es esencial para una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de electricidad a gran escala, almacenamiento de energía,

sistemas de desalinización y unidades de refrigeración para sistemas a pequeña escala, tales como la esterilización y la pasteurización (Cheng et al., 2008). Convencionalmente el vapor es producido por la combustión de combustibles fósiles o de calentamiento directo con electricidad, que son métodos que generan daños ambientales (Elimelech & Phillip, 2011). El empleo de la energía solar para la producción de vapor es un área en creciente desarrollo debido a que esta es una fuente de energía abundante, limpia y renovable (Lu, Chen, Xu, & Yu, 2015).

Actualmente la producción de vapor utilizando energía solar (ya sea con colectores solares o con sistemas de torres solares), se basa en calentar un fluido hasta su punto de ebullición en concentraciones ópticas (superficiales) bajas, generando una alta temperatura (Bae et al., 2015). La construcción de equipos eficientes depende en gran medida de la temperatura superficial y las propiedades de radiación del absorbedor, el cual necesita una alta temperatura para la producción de vapor de lo contrario se producen grandes pérdidas de calor liberadas al ambiente y una baja eficiencia energética (Cheng et al., 2008).

2.4 Tecnología de nanopartículas

Los fluidos convencionales tienen propiedades de transferencia de calor inherentemente pobres en comparación con los sólidos. Por ejemplo, como se ve en el Cuadro 2.4, la conductividad térmica de cobre a temperatura ambiente es aproximadamente 700 veces mayor que la del agua y aproximadamente 3000 veces mayor que la del aceite de motor. La conductividad térmica de los nanotubos de carbono multicapa a temperatura ambiente (Kotaidis, Dahmen, Von Plessen, Springer, & Plech, 2006), es aproximadamente 20.000 veces mayor que la del aceite de motor. Por lo tanto, se espera que las conductividades térmicas de los fluidos que contienen estas partículas sólidas aumenten significativamente con respecto a los fluidos convencionales de transferencia de calor (Baffou & Quidant, 2014).

Numerosos estudios teóricos y experimentales de la eficiencia de la conductividad térmica de las suspensiones sólido-líquido se han realizado desde el trabajo teórico de Maxwell publicado hace más de un siglo, modificado posteriormente por Hamilton y Crosser (2015). Hasta hace poco, estos estudios sobre la conductividad térmica de las suspensiones se habían limitado a partículas de tamaño milimétrico o micrométrico. El principal problema práctico con tales suspensiones es que las partículas se depositan rápidamente fuera de la solución. Además, las suspensiones convencionales de sólido-líquido que contienen partículas de tamaño milimétrico o micrométrico no funcionan con las nuevas tecnologías miniaturizadas porque pueden obstruir los diminutos canales de estos dispositivos (Baffou & Quidant, 2014).

Cuadro 2.3. Comparación de los valores de conductividad térmica de temperatura ambiente para sólidos y líquidos

Material		Rango de conductividad térmica a temperatura ambiente ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Sólidos metálicos	Plata	429
	Cobre	401
	Aluminio	237
Sólidos no metálicos	Diamante	3300
	Nanotubos de carbón	3000
	Silicon	148
	Alúmina	40
Líquidos metálicos	Sodio a 644 K	72.3
Líquidos no metálicos	Agua	0.613
	Etilenglicol	0.253
	Aceite de motor	0.145

Tales dificultades proporcionaron la motivación para el desarrollo de nanofluidos (Bassett et al., 1989), mientras que los recientes avances en las técnicas de síntesis de nanopartículas han permitido este desarrollo. En estos nanofluidos, las nanopartículas permanecen suspendidas durante períodos mucho más largos

que las partículas más grandes y, por debajo del umbral, permanecen en suspensión casi indefinidamente a pesar de diferencias sustanciales en la densidad de nanopartículas y fluidos (Fang, Shan, Wen, Lin, & Owens, 2009).

La gama de combinaciones potencialmente útiles de nanopartículas y fluidos de base es enorme: Las nanopartículas de óxidos, nitruros, metales, carburos metálicos y no metálicos con o sin moléculas tensioactivas pueden dispersarse en fluidos de base tales como agua, etilenglicol o aceites (Park et al., 2009). Para poder producir la combinación de nanopartículas de fluidos más adecuada para una aplicación particular, los investigadores han desarrollado varios métodos para la producción y dispersión de nanopartículas (Ghasemi et al., 2014).

Los estudios experimentales iniciales emplearon un proceso en dos etapas en el que las nanopartículas se producen primero como un polvo seco, típicamente por condensación de gas inerte (Lee, Choi, Li, & Eastman, 1999), que implica la vaporización de un material fuente en una cámara de vacío y la subsiguiente condensación del vapor en nanopartículas a través de colisiones con una presión controlada de un gas inerte como el helio (Diéguez et al., 1997). Las nanopartículas resultantes se dispersan entonces en un fluido en una segunda etapa de procesamiento. A pesar del gran grado de aglomeración de nanopartículas que típicamente ocurre con el proceso de condensación de gas, funciona bien en algunos casos, por ejemplo, con nanopartículas de óxido dispersadas en agua des-ionizada (Lee et al., 1999). Menos éxito se ha logrado al producir nanofluidos que contienen nanopartículas metálicas más pesadas por esta técnica (Lee et al., 1999). Una ventaja de esta técnica en términos de la eventual comercialización de nanofluidos es que la técnica de condensación de gas inerte ya se ha ampliado para producir económicamente cantidades de tonelaje de nanopartículas (Diéguez et al., 1997).

Un segundo método de procesamiento, denominado técnica de evaporación directa, se ha utilizado con éxito para producir nanofluidos que contienen

nanopartículas metálicas dispersas (Yatsuya, Tsukasaki, Mihama, & Uyeda, 1978). Esta técnica, desarrollada por Yatsuya et al. (1978), y posteriormente mejorada por Wagener et al. (1997), sintetiza nanopartículas y las dispersa en un fluido en un solo paso. Como con la técnica de gas-condensación inerte, la técnica implica la vaporización de un material bajo condiciones de vacío.

Aunque la mayoría de los estudios sobre las propiedades térmicas de los nanofluidos hasta la fecha han utilizado una de las técnicas de procesamiento descritas anteriormente, otras técnicas pueden eventualmente resultar superiores, dependiendo de la combinación particular de material de nanopartículas y el tipo de fluido (Eastman, Phillpot, Choi, & Keblinski, 2004). Por ejemplo, se ha modificado recientemente la técnica de condensación de vapor químico, en la que se forman nanopartículas por descomposición térmica de un precursor metal-orgánico arrastrado en un gas portador que pasa a través de un horno, para sintetizar y dispersar nanopartículas no aglomeradas en fluidos en un solo paso (Vasu, Rama Krishna, & Kumar, 2009). En comparación con la técnica de evaporación directa, la condensación química de vapor parece ofrecer ventajas en términos de control del tamaño de partícula, facilidad de escalabilidad y la posibilidad de producir nuevas nano estructuras (Yurkov et al., 2006).

2.5 Generación de vapor con nanopartículas metálicas

Se ha encontrado recientemente que ciertas nanopartículas, especialmente aquellas con propiedades de resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR) (Yeshchenko, Kutsevol, & Naumenko, 2016), pueden absorber la energía solar eficientemente en un medio líquido (Neumann et al., 2013). En una dispersión acuosa de nanopartículas, conduce un rápido aumento de la temperatura de las partículas y la producción de vapor, aunque la mayor parte del flujo todavía estaría en estado sub-enfriado (Lukianova-Hleb et al., 2010). Un equipo de investigación de la Universidad de Rice demostró que mediante el uso de nanopartículas de oro diluidas en una agua, en una proporción de 16.7 ppm, bajo la incidencia de luz solar enfocada a través de un lente de Fresnel, genero

una rápida producción de vapor mientras que la temperatura del fluido se encontraba aun en 6 ° C (Neumann et al., 2013). Se planteó la hipótesis, que el calentamiento rápido de las nanopartículas producen nanoburbujas inmediatamente alrededor de las nanopartículas, y el ascenso de nanoburbujas a la superficie superior del líquido produce la liberación del vapor (Chen, Qiu, Prasad, & Chen, 2014). Ni et al. (2015) demostró que no había producción de nanoburbujas bajo una concentración solar de 10 lux y sugirió que el calentamiento global puede ser responsable de la generación de vapor. A través de una simulación de dinámica molecular, Chen et al. (2014) también demostró que era difícil formar nanoburbujas en condiciones de calefacción continua, incluso bajo una alta potencia de calefacción. También ha de notarse que la mayor parte de los experimentos de generación de vapor con energía solar, sólo realizaron la medición de temperatura en un punto, sin conocer la distribución de la temperatura en el fluido, lo que puede conducir a conclusiones erróneas o inciertas (Neumann et al, 2013).

2.6 Generación de vapor con nanopartículas metálicas en colectores solares

El uso de nanofluidos como trabajo fluidos es una de las tecnologías más prometedoras para aumentar el rendimiento térmico de los colectores solares (Mwesigye et al., 2015). La otra solución es el uso de inserciones en el flujo, una técnica que está asociada con caída de alta presión y por esta razón no es viable.

Los nanofluidos se crean mezclando fluidos de trabajo habituales, como agua o aceite térmico, con nanopartículas que generalmente son metálicas. Las nanopartículas más comunes son Al_2O_3 , CuO , Cu , Al , Fe , TiO_2 y SiO_2 (Ham et al., 2016). El uso de estas nanopartículas conduce a una mayor conductividad térmica en el flujo y, en consecuencia, a una mayor tasa de transferencia de calor desde el tubo caliente al fluido de trabajo, para el caso de CPC. Mayor tasa de transferencia de calor lo que significa un mayor coeficiente de transferencia térmica conduce a una temperatura más baja en el absorbedor del colector y a

una menor pérdidas térmicas, el hecho de que conduce a un mayor rendimiento térmico (Evangelos Bellos & Tzivanidis, 2017).

Esta explicación demuestra el valor de nanofluidos en CPC y hace aclarar el motivo de usarlos. Sin embargo, es esencial determinar la transferencia de calor y la mejora del rendimiento en solar colectores térmicos con precisión para evaluar la utilización de nanofluidos en sistemas solares (Evangelos Bellos & Tzivanidis, 2017).

Una gran cantidad de investigaciones se han centrado en el estudio de los nanofluidos en aplicaciones de transferencia de calor y especialmente en colectores solares. Muchos estudios experimentales y numéricos se han realizado para evaluar la eficiencia de esta innovadora tecnología. Sin embargo, los estudios que se han realizado para el uso de nanofluidos en colectores cilindro parabólicos no son numerosos (Sokhansefat, Kasaeian, & Kowsary, 2014). Sokhansefat et al., (2014) examinaron el uso de nanopartículas de Al_2O_3 en aceite térmico y demostraron que el coeficiente de transferencia de calor en el CPC analizado se puede mejorar hasta en un 14%. Se demostró que la tasa de transferencia de calor se puede aumentar en un CPC mediante el uso de Al_2O_3 /nanofluido de aceite. Mwesigye et al. (2015) examinó el uso de las mismas nanopartículas en Syltherm 800 para diversas concentraciones (hasta 8%) y demostraron que una mayor concentración conduce a una mejor eficiencia (Zadeh, Sokhansefat, Kasaeian, Kowsary, & Akbarzadeh, 2015). Utilizaron el software ANSYS y usaron el método de minimización de generación de entropía, mencionaron que para una concentración del 4%, la mejora de transferencia de calor es 35%, mientras que para 8% la mejora alcanza al 76%. Además, Mwesigye et al. (2016) en un estudio similar examinó el uso de nanopartículas de Cu en Therminol VP-1. La mejora de la transferencia de calor que se encuentra es del 8%, 18% y 32% para las concentraciones de nanopartículas 2%, 4% y 6% respectivamente. Bellos et al. (2017) realizó un estudio energético

y exergético que compara el uso de Al_2O_3 en el aceite de transferencia de calor con Solidworks Flow Simulation.

Kasaeian et al. (2015) demostró que el uso de nanotubos de carbono / nanofluido de petróleo en un CPC piloto conduce a una importante mejora en la eficiencia térmica. Ghasemi et al. (2016) comparó el uso de Al_2O_3 y nanopartículas de CuO en agua con simulaciones de CFD. Ellos finalmente demostraron que la transferencia de calor en el CPC aumenta 28% y 35% con Al_2O_3 y CuO respectivamente. El uso de nanofluidos es una forma pionera para mejorar el rendimiento de CPCs (Bellos, 2017).

2.7 Limitantes en el uso de nanopartículas

Hay algunas consideraciones importantes a las que se les debe poner atención importante para el uso eficiente de un nanofluido como fluido de transferencia de calor en colectores solares (Pantzali, Mouza, & Paras, 2009). La primera consideración debería ser la síntesis del nanofluido (Saidur, Leong, & Mohammad, 2011). Ya que suspender nanopartículas sólidas en el fluido base no resulta una mezcla simple (Behi & Mirmohammadi, 2012), la estabilidad del nanofluido debería ser investigado a fondo (Hordy, Rabilloud, Meunier, & Coulombe, 2014). Debido a la alta relación de área de superficie con el volumen, las nanopartículas tendrán una tendencia a agregarse con el tiempo debido a la alta tensión superficial entre ellos (Sarsam, Kazi, & Badarudin, 2015). Tal aglomeración de las nanopartículas hará que se asienten y bloqueen los canales de flujo, y también disminuirá la conductividad térmica del nanofluido. En consecuencia, para tener éxito en la adición de nanofluidos, es esencial investigar y examinar los principales factores que afectan la estabilidad de la dispersión de nanofluidos (Lee y Mudawar, 2007; Li et al., 2009; Yu y Xie, 2012). La estabilidad del nanofluido puede ser mejorado por diferentes métodos. Sin embargo, la mayoría de métodos eficientes es mediante la adición de surfactantes, para aumentar la estabilidad de la dispersión de nanopartículas en el nanofluido (Ghadimi & Metselaar, 2013). Sin embargo, debido a los ciclos de

enfriamiento y calentamiento que ocurren en la transferencia de calor, los surfactantes tienen una tendencia a crear espuma, que tiene efectos negativos sobre la viscosidad y la conductividad térmica de los nanofluidos, un fenómeno que debe ser examinado cuidadosamente (Mingzheng, Guodong, Jian, Lei, & Lijun, 2012).

El segundo punto a considerar es el costo del nanofluido, que es relativamente alto debido a complicaciones en el proceso de fabricación de nanopartículas (Lee y Mudawar, 2007; Pantzali et al., 2009). Por lo tanto, se tendría que experimentar con una concentración baja de nanopartículas para tener una conductividad térmica relativamente alta, también debería usarse para sintetizar un nanofluido que tiene alta conductividad térmica y un alto coeficiente de transferencia de calor (Saidur et al., 2011).

Este enfoque es importante porque se ha investigado que nanofluidos con menor concentración de nanopartículas tienen mayor estabilidad (Behi & Mirmohammadi, 2012). Por otra parte, el uso de una concentración baja de nanopartículas conduce al tercer punto que debe considerarse, es decir, la viscosidad del nanofluido y su efecto sobre la caída de presión y el poder de bombeo. Nanofluidos con concentraciones altas de nanopartículas tienen viscosidades más altas (Sun et al., 2007). La caída de presión asociada con cualquier fluido es uno de los factores esenciales que deben ser considerado al evaluar su factibilidad para su aplicación (Saidur et al., 2011). El aumento en la viscosidad del nanofluido sobre el del fluido base causará un aumento en la caída de presión, que está relacionada estrechamente la potencia de bombeo requerido (Mahian, Kianifar, Kalogirou, Pop, & Wongwises, 2013). Esto se considera una de las desventajas de usar nanofluidos como fluido de trabajo.

2.8 Nanopartículas no metálicas

En la actualidad, debido a sus excelentes propiedades térmicas, mecánicas y ópticas (Sidik, Yazid, & Samion, 2017), los materiales de carbono también han atraído atenciones especiales para las colecciones térmicas solares, como el nanotubo de carbono (Farbod & Ahangarpour, 2016) y el grafema (Esfahani &

Languri, 2017). Sin embargo, dichos materiales son de alto costo y un proceso de preparación complejo (Mesgari et al., 2016), lo que dificulta su amplia aplicación en la práctica. Las nanopartículas de negro de carbono pueden ser una alternativa por su bajo costo y amplia disponibilidad. (Povacz, Wallner, & Lang, 2014) exploraron el efecto del negro de humo sobre el rendimiento de los materiales de polipropileno pigmentado en negro en la utilización de la energía solar térmica, y encontraron que los compuestos de polipropileno que contienen un pequeño porcentaje de negro de humo mostraron una absorbancia solar integral de aproximadamente 95% y una emitancia infrarroja integral del 93% al 95%. Sin embargo, el problema de la agregación aún debe ser resuelto para las nanopartículas de negro de carbón, ya que su pequeño tamaño da lugar a la atracción mejorada de Van Der Waals (Ilyas, Pendyala, & Narahari, 2017).

2.9 Literatura citada

* Se anexa literatura citada en el capítulo 1. Introducción general

- Allouhi, A., Boharb, A., Ratlamwala, T., Kousksou, T., Amine, M. B., Jamil, A., & Msaad, A. A. (2017). Dynamic analysis of a thermoelectric heating system for space heating in a continuous-occupancy office room. *Applied Thermal Engineering*, 113, 150-159.
- Bae, K., Kang, G., Cho, S. K., Park, W., Kim, K., & Padilla, W. J. (2015). Flexible thin-film black gold membranes with ultrabroadband plasmonic nanofocusing for efficient solar vapour generation. *Nature communications*, 6, 10103.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K., & Gkinis, G. (2016). Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy*, 94, 213-222.
- Chafie, M., Aissa, M. F. B., Bouadila, S., Balghouthi, M., Farhat, A., & Guizani, A. (2016). Experimental investigation of parabolic trough collector system under Tunisian climate: design, manufacturing and performance assessment. *Applied Thermal Engineering*, 101, 273-283.
- Fouda, M., Elwakil, A., Radwan, A., & Allagui, A. (2016). Power and energy analysis of fractional-order electrical energy storage devices. *Energy*, 111, 785-792.
- Ham, H., Kim, J., Cho, S. J., Choi, J.-H., Moon, D. J., & Bae, J. W. (2016). Enhanced stability of spatially confined copper nanoparticles in an ordered mesoporous alumina for dimethyl ether synthesis from syngas. *ACS Catalysis*, 6(9), 5629-5640.

- Huang, Z., Yu, G., Li, Z., & Tao, W. (2015). Numerical study on heat transfer enhancement in a receiver tube of parabolic trough solar collector with dimples, protrusions and helical fins. *Energy Procedia*, 69, 1306-1316.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016a). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016b). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- khosrojerdi, S., Lavasani, A. M., & Vakili, M. (2017). Experimental study of photothermal specifications and stability of graphene oxide nanoplatelets nanofluid as working fluid for low-temperature Direct Absorption Solar Collectors (DASCs). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 164, 32-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.02.007>
- Manasrah, A. D., Al-Mubaiyedh, U. A., Lau, T., Ben-Mansour, R., Al-Marri, M. J., Almanassra, I. W., . . . Atieh, M. A. (2016). Heat transfer enhancement of nanofluids using iron nanoparticles decorated carbon nanotubes. *Applied Thermal Engineering*, 107, 1008-1018.
- Mesgari, S., Taylor, R. A., Hjerrild, N. E., Crisostomo, F., Li, Q., & Scott, J. (2016). An investigation of thermal stability of carbon nanofluids for solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 652-659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.032>
- Mwesigye, A., Huan, Z., & Meyer, J. P. (2015). Thermodynamic optimisation of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil–Al₂O₃ nanofluid. *Applied energy*, 156, 398-412.
- Sidik, N. A. C., Samion, S., Ghaderian, J., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017). Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 79-89.
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K., & Mitsopoulos, G. (2015). Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 226-237.
- Wang, Y., Xu, J., Liu, Q., Chen, Y., & Liu, H. (2016). Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 107, 469-478.
- Yan, W. L., Dasari, A., & Kong, L. B. (2014). Chinese ink-facilitated fabrication of carbon nanotube/polyvinyl alcohol composite sheets with a high nanotube loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 209-215. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.005>
- Zhang, N., Li, X., Ye, H., Chen, S., Ju, H., Liu, D., . . . Xu, Q. (2016). Oxide defect engineering enables to couple solar energy into oxygen activation. *Journal of the American Chemical Society*, 138(28), 8928-8935.
- Zhou, Z., Zhang, Z., Zuo, J., Huang, K., & Zhang, L. (2015). Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 692-703.

- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. (2017). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*.
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2016). Solar electricity and solar fuels: status and perspectives in the context of the energy transition. *Chemistry–A European Journal*, 22(1), 32-57.
- Bae, K., Kang, G., Cho, S. K., Park, W., Kim, K., & Padilla, W. J. (2015). Flexible thin-film black gold membranes with ultrabroadband plasmonic nanofocusing for efficient solar vapour generation. *Nature communications*, 6, 10103.
- Baffou, G., & Quidant, R. (2014). Nanoplasmonics for chemistry. *Chemical Society Reviews*, 43(11), 3898-3907.
- Baranov, V. K., & Melnikov, G. K. (1966). Sov. J. Opt. Technol. "Study of the Illumination Characteristics of Hollow Focons.", 33, 408.
- Bassett, I., Welford, W., & Winston, R. (1989). III Nonimaging Optics for Flux Concentration. In *Progress in Optics* (Vol. 27, pp. 161-226): Elsevier.
- Behi, M., & Mirmohammadi, S. A. (2012). Investigation on thermal conductivity, viscosity and stability of nanofluids. *Master of Science Thesis EGI-2012, Royal Institute of Technology (KTH), School of Industrial Engineering and Management, Department of Energy Technology, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Stockholm, Sweden*.
- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2, 71-79.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K., & Gkinis, G. (2016). Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy*, 94, 213-222.
- Chen, G., Qiu, H., Prasad, P. N., & Chen, X. (2014). Upconversion nanoparticles: design, nanochemistry, and applications in theranostics. *Chemical Reviews*, 114(10), 5161-5214.
- Cheng, A.-J., Tzeng, Y., Zhou, Y., Park, M., Wu, T.-h., Shannon, C., . . . Lee, W. (2008). Thermal chemical vapor deposition growth of zinc oxide nanostructures for dye-sensitized solar cell fabrication. *Applied Physics Letters*, 92(9), 092113.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *nature*, 488(7411), 294.
- Diéguez, A., Romano-Rodríguez, A., Ramón Morante, J., Bârsan, N., Weimar, U., & Göpel, W. (1997). Nondestructive assessment of the grain size distribution of SnO₂ nanoparticles by low-frequency Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 71(14), 1957-1959.
- Eastman, J. A., Phillpot, S., Choi, S., & Keblinski, P. (2004). Thermal transport in nanofluids. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 34, 219-246.
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *science*, 333(6043), 712-717.

- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
- Esence, T., Bruch, A., Molina, S., Stutz, B., & Fourmigué, J.-F. (2017). A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 153, 628-654.
- Esfahani, M. R., & Languri, E. M. (2017). Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 83, 100-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.12.004>
- Espinosa, O., & Alexandra, G. (2013). *Análisis del impacto potencial de la implementación de energía alternativa solar en la industria textilera del Cantón Quito*. SANGOLQUÍ/ESPE/2013,
- Fang, J., Shan, X.-q., Wen, B., Lin, J.-m., & Owens, G. (2009). Stability of titania nanoparticles in soil suspensions and transport in saturated homogeneous soil columns. *Environmental pollution*, 157(4), 1101-1109.
- Farbod, M., & Ahangarpour, A. (2016). Improved thermal conductivity of Ag decorated carbon nanotubes water based nanofluids. *Physics Letters A*, 380(48), 4044-4048. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.10.014>
- 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.
- Fouquet, D. (2013). Policy instruments for renewable energy—From a European perspective. *Renewable Energy*, 49, 15-18.
- Ghadimi, A., & Metselaar, I. H. (2013). The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 1-9.
- Ghasemi, H., Ni, G., Marconnet, A. M., Loomis, J., Yerci, S., Miljkovic, N., & Chen, G. (2014). Solar steam generation by heat localization. *Nature communications*, 5, ncomms5449.
- Ham, H., Kim, J., Cho, S. J., Choi, J.-H., Moon, D. J., & Bae, J. W. (2016). Enhanced stability of spatially confined copper nanoparticles in an ordered mesoporous alumina for dimethyl ether synthesis from syngas. *ACS Catalysis*, 6(9), 5629-5640.
- Hasnain, S. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127-1138.
- Hordy, N., Rabilloud, D., Meunier, J.-L., & Coulombe, S. (2014). High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors. *Solar Energy*, 105, 82-90.
- IEA bioenergy update. (2018). *Biomass and Bioenergy*, 117, iii-ix. doi:[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(18\)30207-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(18)30207-1)
- Ilyas, S. U., Pendyala, R., & Narahari, M. (2017). Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 527, 11-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.004>

- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Kotaidis, V., Dahmen, C., Von Plessen, G., Springer, F., & Plech, A. (2006). Excitation of nanoscale vapor bubbles at the surface of gold nanoparticles in water. *The Journal of chemical physics*, 124(18), 184702.
- Lee, S., Choi, S.-S., Li, S., and, & Eastman, J. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat transfer*, 121(2), 280-289.
- Lu, L., Chen, W., Xu, T., & Yu, L. (2015). High-performance ternary blend polymer solar cells involving both energy transfer and hole relay processes. *Nature communications*, 6, 7327.
- Lukianova-Hleb, E., Hu, Y., Latterini, L., Tarpani, L., Lee, S., Drezek, R. A., . . . Lapotko, D. O. (2010). Plasmonic nanobubbles as transient vapor nanobubbles generated around plasmonic nanoparticles. *ACS nano*, 4(4), 2109-2123.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied energy*, 137, 511-536.
- Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. (2013). A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582-594.
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2010). Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 754-762.
- Mathew, S., Visavale, G., & Mali, V. (2016). CFD Analysis of a Heat Collector Element in a Solar Parabolic Trough Collector. In: Retrieved.
- Mesgari, S., Taylor, R. A., Hjerrild, N. E., Crisostomo, F., Li, Q., & Scott, J. (2016). An investigation of thermal stability of carbon nanofluids for solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 652-659. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.032>
- Mingzheng, Z., Guodong, X., Jian, L., Lei, C., & Lijun, Z. (2012). Analysis of factors influencing thermal conductivity and viscosity in different kinds of surfactant solutions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 22-29.
- Muneer, T., Maubleu, S., & Asif, M. (2006). Prospects of solar water heating for textile industry in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(1), 1-23.
- Mwesigye, A., Huan, Z., & Meyer, J. P. (2015). Thermodynamic optimisation of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil–Al₂O₃ nanofluid. *Applied energy*, 156, 398-412.
- Neumann, O., Feronti, C., Neumann, A. D., Dong, A., Schell, K., Lu, B., . . . Grady, N. (2013). Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(29), 11677-11681.

- Oyedepo, S. O. (2012). Energy and sustainable development in Nigeria: the way forward. *Energy, Sustainability and Society*, 2(1), 15.
- Pantzali, M., Mouza, A., & Paras, S. (2009). Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). *Chemical Engineering Science*, 64(14), 3290-3300.
- Park, M. V., Annema, W., Salvati, A., Lesniak, A., Elsaesser, A., Barnes, C., . . . Dawson, K. A. (2009). In vitro developmental toxicity test detects inhibition of stem cell differentiation by silica nanoparticles. *Toxicology and applied pharmacology*, 240(1), 108-116.
- Pinzón, C. L. G., Corral, C. P., Nájera, R. A. V., & Campos, D. A. (2016). Selección de un sistema solar fotovoltaico para un vehículo eléctrico. *CULCyT*(50).
- Povacz, M., Wallner, G. M., & Lang, R. W. (2014). Black-pigmented polypropylene materials for solar thermal absorbers – Effect of carbon black concentration on morphology and performance properties. *Solar Energy*, 110, 420-426. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.024>
- Qiu, Y., He, Y.-L., Cheng, Z.-D., & Wang, K. (2015). Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Applied energy*, 146, 162-173.
- Rabl, A. (1976). Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*, 18(2), 93-111.
- Saidur, R., Leong, K., & Mohammad, H. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1646-1668.
- Sarsam, W. S., Kazi, S. N., & Badarudin, A. (2015). A review of studies on using nanofluids in flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 122, 1245-1265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.032>
- Schnitzer, H., Brunner, C., & Gwehenberger, G. (2007). Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), 1271-1286.
- Sidik, N. A. C., Yazid, M. N. A. W. M., & Samion, S. (2017). A review on the use of carbon nanotubes nanofluid for energy harvesting system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 782-794. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.047>
- Sokhansefat, T., Kasaeian, A., & Kowsary, F. (2014). Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 636-644.
- Solangi, K., Islam, M., Saidur, R., Rahim, N., & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149-2163.
- Sun, L., Sung, K.-B., Dentinger, C., Lutz, B., Nguyen, L., Zhang, J., . . . Lu, Y. (2007). Composite organic– inorganic nanoparticles as Raman labels for tissue analysis. *Nano Letters*, 7(2), 351-356.
- Suresh, D., O'Gallagher, J., & Winston, R. (1990). Thermal and optical performance test results for compound parabolic concentrators (CPCs). *Solar Energy*, 44(5), 257-270.

- Tapia, S., & Del Rio, J. (2009). Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. *Revista mexicana de física E*, 55(2), 141-153.
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102.
- Vargas, E., & Danitza, L. (2016). *Diseño e implementación del sistema de energía solar fotovoltaico, como estrategia de energización para el conjunto El Limonar en el municipio de Los Patios, Norte de Santander*. Universidad Piloto de Colombia,
- Vasu, V., Rama Krishna, K., & Kumar, A. (2009). Heat transfer with nanofluids for electronic cooling. *International Journal of Materials and Product Technology*, 34(1-2), 158-171.
- Wang, Y., Quan, C., & Tay, C. (2015). Optical color image encryption without information disclosure using phase-truncated Fresnel transform and a random amplitude mask. *Optics Communications*, 344, 147-155.
- Winston, R., & Hinterberger, H. (1975). Principles of cylindrical concentrators for solar energy. *Solar Energy*, 17(4), 255-258.
- Yatsuya, S., Tsukasaki, Y., Mihama, K., & Uyeda, R. (1978). Preparation of extremely fine particles by vacuum evaporation onto a running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 45, 490-494.
- Yeshchenko, O. A., Kutsevol, N. V., & Naumenko, A. P. (2016). Light-induced heating of gold nanoparticles in colloidal solution: dependence on detuning from surface plasmon resonance. *Plasmonics*, 11(1), 345-350.
- Yurkov, G. Y., Baranov, D., Kozinkin, A., Nedoseikina, T., Koksharov, Y. A., & Gubin, S. (2006). Copper nanoparticles on the surface of ultradispersed polytetrafluoroethylene nanograins. *Russian journal of inorganic chemistry*, 51(2), 170-176.
- Zadeh, P. M., Sokhansefat, T., Kasaeian, A., Kowsary, F., & Akbarzadeh, A. (2015). Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanofluid. *Energy*, 82, 857-864.
- Zhou, Z., Zhang, Z., Zuo, J., Huang, K., & Zhang, L. (2015). Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 692-703.

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE COLECCIÓN DE ENERGÍA SOLAR AFECTADO POR RELLENO DE DISTINTA GRANULOMETRÍA

3.1 Resumen

La demanda energética mundial ha crecido con el aumento demográfico en décadas recientes, el agotamiento de fuentes de energía fósiles ha generado la búsqueda de alternativas sustentables e innovadoras de fuentes de energía. Es por ello que se desarrolló la siguiente investigación en la cual se utiliza un colector parabólico compuesto (CPC) como sistema de captación de energía. Los fluidos de trabajo evaluados dentro del sistema fueron los siguientes: se colocó un sinfín de acero galvanizado dentro del concentrador, balines de acero Bbs (4.5 mm), balines de cobre (4.5 mm) y rebabas de cobre, y agua pura como testigo. Los resultados obtenidos de acuerdo a los factores de análisis, ángulo de inclinación del sistema colector con cuatro niveles (30, 35, 40 y 45°) y el fluido de trabajo, siendo las variables respuesta, la temperatura alcanzada a los 120 min (T_{120}), calor absorbido (Q_{abs}), se sometieron a análisis de varianza y a pruebas de comparación de medias de tratamiento mediante el estadístico de Tukey con nivel de significancia de 0.05. En el experimento el mejor tratamiento es el fluido adicionado con rebabas de cobre el cual registro (T_{120}) de 86.52 °C, (Q_{abs}) de 67.8887 J, con un ángulo de inclinación de 30 grados. El aumento del área superficial de contacto del fluido de trabajo aumento la eficiencia en un 56 % con respecto al testigo al haber una reducción en el intervalo de tiempo en el cual la temperatura aumenta llegando a estar cerca de la ebullición en el tiempo evaluado.

Palabras clave: Fluido, colector, ebullición, calor absorbido, inclinación.

Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Eder Reyes Cortés

Director de Tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

SOLAR ENERGY COLLECTION SYSTEM AFFECTED BY FILLING PARTICLES WITH DIFFERENT GRANULOMETRY⁴

3.2 Abstract

The global energy demand has grown with the demographic increase in recent decades, the depletion of fossil energy sources has generated the search for sustainable and innovative alternatives of energy sources. That is why the following research was developed in which a composite parabolic collector (CPC) is used as an energy capture system. The working fluids evaluated within the system were as follows: a galvanized steel auger was placed inside the concentrator, Bbs steel pellets (4.5 mm), copper pellets (4.5 mm) and copper burrs, and pure water as a control. The results obtained according to the analysis factors, angle of inclination of the collector system with four levels (30, 35, 40 and 45 °) and the working fluid, the response variables being the temperature reached at 120 min (T_{120}), absorbed heat (Q_{abs}), were subjected to analysis of variance and comparison tests of means of treatment using the Tukey statistic with significance level of 0.05. In the experiment the best treatment is the fluid added with copper burrs which register (T_{120}) of 86.52 ° C, (Q_{abs}) of 67.8887 J, with an angle of inclination of 30 degrees. The increase in the contact surface area of the working fluid increased the efficiency by 56% with respect to the control, as there was a reduction in the time interval in which the temperature increases, reaching near the boiling point in the time evaluated.

Keywords: Fluid, collector, boiling, heat absorbed, inclination.

3.3 Introducción

Uno de los retos a los que nos enfrentamos en la actualidad es la disminución acelerada de combustibles fósiles los cuales son utilizados en gran cantidad de procesos industriales que necesitan abasto de energía. Por lo tanto, es vital apostar por fuentes de energía ecológicas para mejorar el cuidado del mundo en un futuro (Alanne & Saari, 2006). Teniendo en cuenta las fuentes de energía renovables, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, es de vital importancia su uso. Sin embargo, la energía solar podría ser la mejor opción para el futuro en el mundo debido a varias razones: primero, la energía solar es la fuente de energía renovable más abundante y este se emite a una tasa de 3.8×10^{23} kW, de los cuales aproximadamente 1.8×10^{14} kW es interceptado por la tierra (Panwar, Kaushik, & Kothari, 2011). En la actualidad, una serie de nuevos proyectos de energía solar a gran escala están en uso o están en desarrollo tanto en países desarrollados como en desarrollo. Se ha encontrado que los colectores parabólicos compuestos (CPC) son adecuados para regiones sin nubes frecuentes o neblina, aunque el sistema es más caro que la tecnología fotovoltaica. Por el momento, las tecnologías fotovoltaicas pueden seguir siendo la fuente principal de generación de energía solar (Bellas & Lidorikis, 2017). Los CPC enfocan la radiación solar directa en una línea focal en el eje colector. Un tubo receptor con un fluido que fluye dentro de ese absorbe la energía solar concentrada de las paredes del tubo y causa la elevación de la temperatura (Fernández-García et al., 2010). Los CPC pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones tales como el calentamiento solar pasivo, calentamiento solar activo, calentamiento de espacios, producción de agua caliente, bombas de calor, enfriamiento por absorción, sistemas de refrigeración, calor de procesos industriales para aplicaciones de agua o aire, desalinización (evaporación súbita multietapa, ebullición múltiple efecto, compresión de vapor) y sistemas químicos solares para sistemas de potencia térmica (Kalogirou, 2004). Hoy en día, el diseño óptico de un colector CPC es sencillo utilizando los métodos de cálculo de la óptica sin formación de imágenes y técnicas de trazado de rayos estándar. Debido a que la eficiencia del colector está determinada por las ganancias de

energía solar y las pérdidas térmicas, un análisis detallado de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación debe complementar el diseño óptico (Singh & Eames, 2011). Las estrategias enfocadas a aumentar la conversión de energía solar buscan aumentar la eficiencia del colector solar parabólico optimizando la geometría del colector, cambiando el fluido de trabajo y seleccionando los materiales apropiados para el tubo absorbente (Patil, Panse, & Joshi, 2014). Al determinar la geometría y la eficiencia térmica de un sistema CPC, el rendimiento térmico y la energía del fluido de transferencia de calor (HTF) se pueden estimar en diferentes condiciones. Uno de los elementos más importantes y clave de este sistema es la relación entre la concentración de radiación solar (tasa de concentración) y el área de superficie del receptor (Behar, Khellaf, & Mohammedi, 2015). Durante la operación de un CPC, la energía transita, en secuencia, de la fuente de radiación térmica a las involutas, luego a la superficie externa del tubo, después hacia el otro lado de la pared del tubo y de allí al fluido de proceso contenido en el interior del tubo colector. Si bien en la trayectoria externa el mecanismo predominante es la radiación, en el paso de la superficie interna al fluido, la energía es transportada por un mecanismo de convección, lo que implica una dependencia del contacto del fluido con la superficie de calefacción. En tal sentido, en virtud de que un incremento en el área de contacto pared-fluido favorece la transferencia de calor (Holman, 1986), se planteó la hipótesis que la incorporación de partículas en suspensión con el fluido de proceso causará un incremento del área de contacto y ello se traducirá en un incremento en la energía colectada por dicho fluido. Por lo anterior la investigación desarrollada en el presente trabajo se enfocó en la construcción de un concentrador parabólico compuesto (CPC) con el objetivo de explorar el efecto del aumento de área superficial de contacto del fluido con el material conductor a través de la adición de distintos materiales metálicos de diferente granulometría dentro del tubo concentrador, para aumentar la eficiencia térmica del sistema.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Materiales

Se diseñó y construyó un prototipo CPC en el Taller de Manufactura del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma Chapingo, el cual consta de los siguientes materiales: estructura metálica de 1.5 plg, tubo de cobre de 2 plg, acero inoxidable 430 BA (tipo espejo), tabla de madera, reflectores de alógeno de 500 W, termopares tipo K, sistema de adquisición de datos (Datalogger), basado en el sistema de programación Arduino®.

3.4.2 Colector solar parabólico compuesto

Para la construcción del CPC se aceptó la geometría sugerida por Souliotis y Tripanagnostopoulos (2004). En la figura 3.1, se presenta la sección transversal del modelo construido, el cual consiste en un reflector CPC simétrico truncado con partes parabólicas (AB), (DA') y partes involutas (BC) y (C'D). El punto de intersección entre los ejes BB' y DD' correspondientes a las parábolas tendidas sobre la superficie de apertura (cubierta transparente) determina el nivel de truncación para la construcción del modelo a experimentar. Se considera R_T , como el radio del receptor cilíndrico, ω y ω' los ángulos para formar las dos partes involutas del reflector (BC) y (C'D) correspondientemente, con ψ , ψ' los ángulos de las dos partes parabólicas del reflector (AB) y (DA'), respectivamente. Además, en la Figura 5 se considera la dirección del crecimiento de los ángulos ω , ω' , ψ y ψ' . Los ángulos máximos ω y ω' son tomados como $\omega_m = \omega'_m = 90^\circ$, los ángulos máximos ψ y ψ' (ángulos de borde) son $\psi_m = \psi'_m = 90^\circ$ y las longitudes focales son $f_1 = [BE] = \pi R_T/2$ y $f_1 = [DE'] = \pi R_T/2$, respectivamente.

- Parte parabólica (AB):
$$x = -R_T + \left[\frac{\pi \sin \psi}{(1 + \cos \psi)} \right] \quad (3.1)$$

$$y = \frac{-R_T \cos \psi}{1 + \cos \psi} \quad (3.2)$$

- Parte involuta (BC):
$$x = -R_T (\sin \omega - \omega \cos \omega) \quad (3.3)$$

$$(3.4)$$

- $y = -R_T(\cos \omega - \omega \sin \omega)$
 Parte involuta (C'D): $x = R_T(\sin \omega - \omega \cos \omega)$ (3.5)
 $y = R_T(\cos \omega - \omega \sin \omega)$ (3.6)
- Parte parabólica (DA'): $x = \frac{R_T \cos \psi}{(1 + \cos \psi)}$ (3.7)
 $y = R_T \left[1 + \frac{\pi \sin \psi}{1 + \cos \psi} \right]$ (3.8)

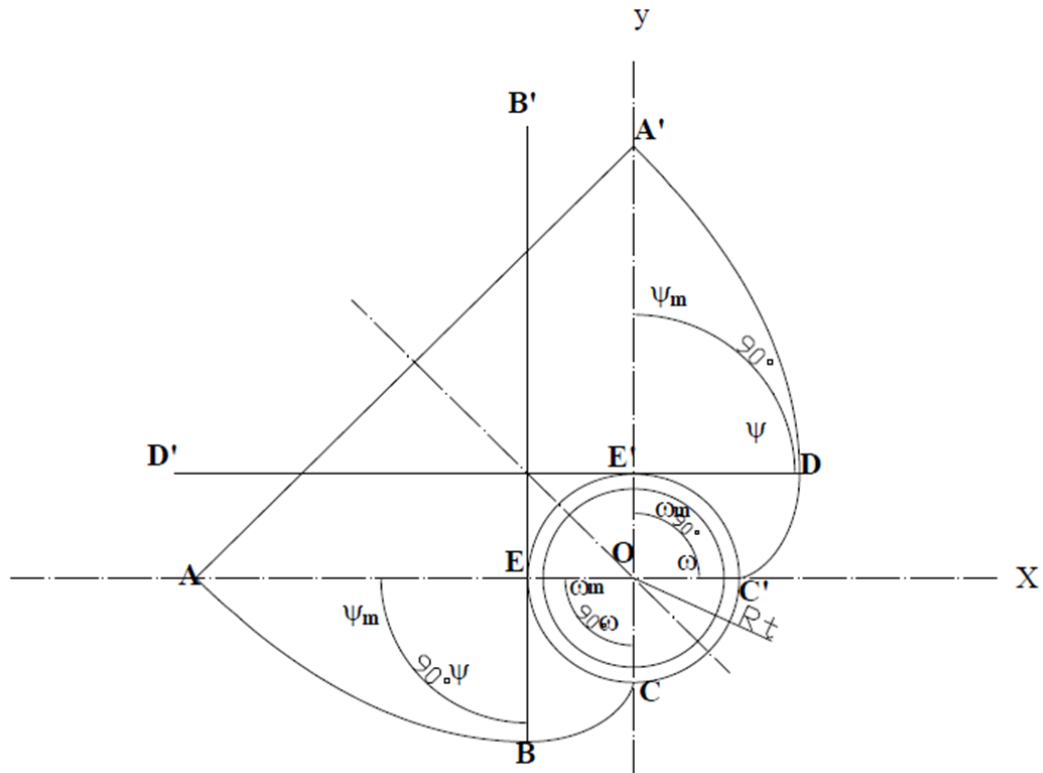


Figura 3.1. Geometría del CPC (Souliotis y Tripanagnostopoulos, 2004).

Se construyó un sistema de colección de energía radiante con la estructura mostrada en las Figuras 3.2, 3.4 y 3.5. El diseño se basó principalmente sobre la distribución no uniforme de la radiación solar sobre la superficie del absorbedor. Esto fue logrado por el uso de un reflector CPC en combinación con un receptor cilíndrico.

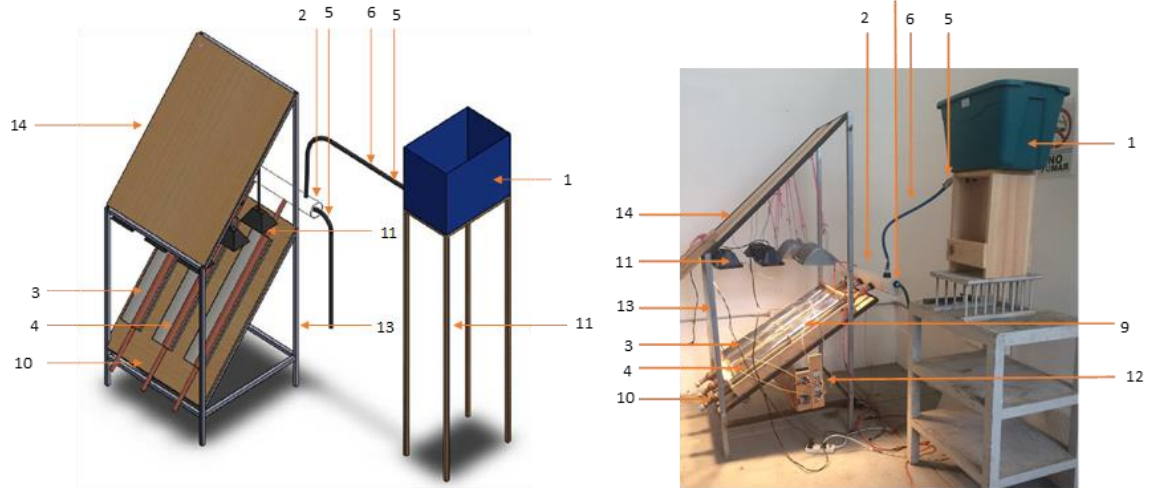


Figura 3.2. Sistema de colección de energía radiante diseñado en SolidWorks®, vista frontal (A), estructura del sistema de colección de energía radiante real (B). La notación se describe en el cuadro 3.1.

La estructura donde se colocó el CPC fue como se muestra en la Figura 3.3, la cual permitió el movimiento de la plataforma contenedora del colector y con la capacidad de manejar cuatro ángulos de prueba.

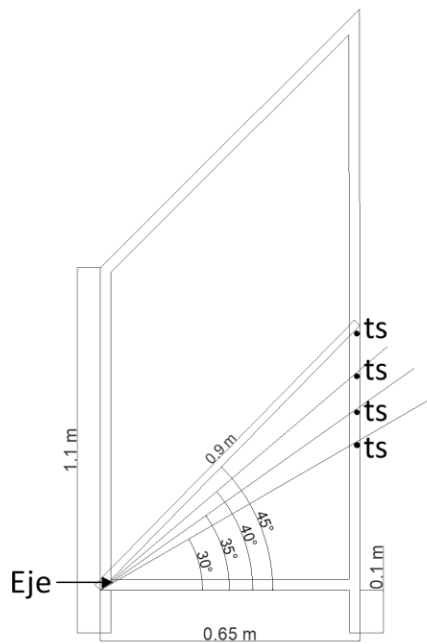


Figura 3.3. Vista lateral de estructura de soporte del sistema colector. Ts: tornillo sujetador.

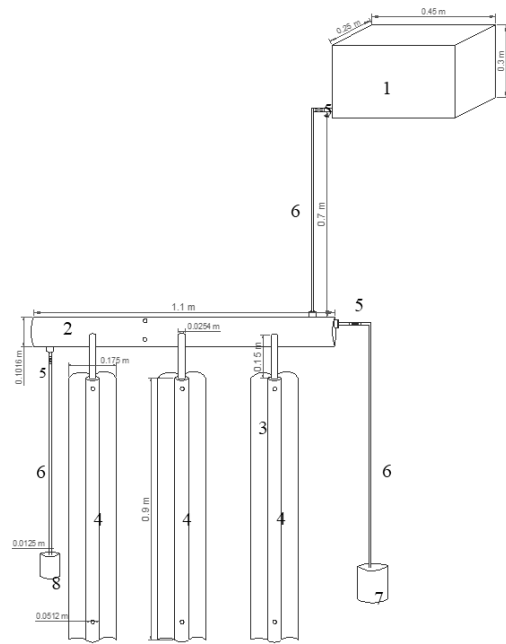


Figura 3.4. Sistema experimental de colección de energía radiante.

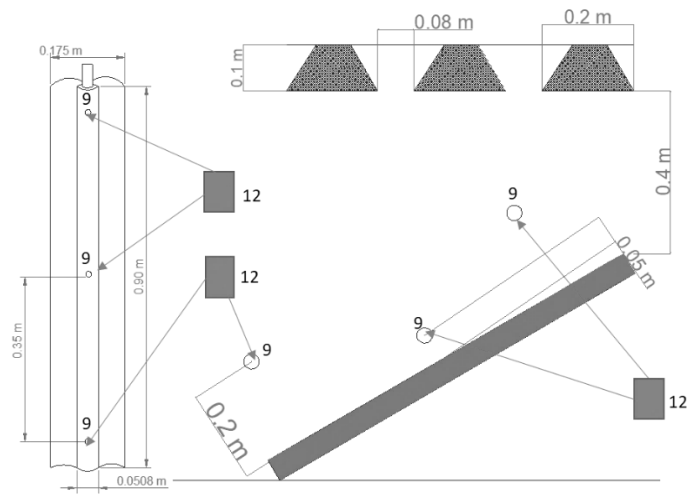


Figura 3.5. Sistema de radiación térmica y localización de termopares en el espacio libre entre el CPC y el tubo, ubicación de sistema Arduino (Data logger) y el sistema de iluminación. La notación se describe en el Cuadro 3.1.

El sistema se instrumentó con termopares tipo K, conectados a una tarjeta Arduino UNO y una Data Shield. Se desarrolló un código de programación (Anexo 1), con las librerías; "max6675.h" (módulo para convertir los valores binarios del termopar tipo K a ° C), <Wire.h> (permite el almacenamiento de datos en un archivo "txt"), "RTCLib.h" (modulo reloj, permite la programación del intervalo de tiempo de registro de datos), <SPI.h> (permite la lectura del Arduino UNO de la Data Shield), <SD.h> (permite el almacenamiento de datos en una tarjeta SD). Los termopares en el tubo concentrador fueron colocados en su interior a una distancia de 0.125 m del inicio del tubo, a 0.125 m antes del final del tubo y otro más colocado en el centro del tubo, es decir a 0.45 m, para poder determinar la diferencia de temperatura del fluido de trabajo dentro del concentrador, el registro de temperatura fue cada minuto en todos los ensayos. Los termopares en el tanque de almacenamiento del CPC fueron colocados en la parte inferior y superior de éste como se muestra en la Figura 3.3, el registro de temperatura se realizó cada 5 min. Los termopares colocados en el espacio entre el colector y los reflectores estuvieron a una distancia de 0.2 m (T1 y T2), 0.05 m (T3) y también el registro de temperatura se realizó cada 5 min. Las condiciones del

ensayo fueron las siguientes: Iluminación: 500 W/m², Fluido: Agua en régimen estacionario.

Cuadro 3.1. Identificación de elementos del sistema de colección energía radiante mostrado en las Figuras 3.2, 3.4 y 3.5.

Identificador	Descripción
1	Recipiente de plástico de 0.45 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.35 m de alto
2	Tubo de CPVC con un diámetro de 0.1016 m y longitud de 1.1 m .
3	Acero inoxidable 430 BA (tipo espejo), se construyeron las involutas con una longitud de 0.94 m y un ancho de 0.17 m.
4	Tubo de cobre con un diámetro de 0.0508 m y longitud de 1.2 m, de los cuales solo 0.9 m fueron evaluados en el sistema.
5	Válvulas de paso con un diámetro de 0.0190 m.
6	Mangueras de plástico con un diámetro de 0.0190 m.
7	Recipiente de plástico con un diámetro de 0.15 m y longitud de 0.2 m.
8	Recipiente de plástico con un diámetro de 0.15 m y longitud de 0.2 m.
9	Termopares tipo K con un rango de medición de – 15 a 350 °C.
10	Tubo de cobre con un diámetro de 0.0254 m.
11	Reflectores de alógeno con una potencia de 500 W.
12	Data logger con sistema Arduino UNO.
13	PTR de 1.5 plg
14	Madera de 0.86 m de largo, 0.85 m de ancho y espesor de 0.5 plg.

3.4.3 Área superficial

A medida que el tamaño de partícula disminuyo, el área superficial por unidad de masa aumento, por lo que se ensayó con partículas con uniformidad geométrica, Particularmente, se usó un tornillo sinfín, balines y rebabas de cobre, asumiendo figuras geométricas de la esfera y el ortoedro. La superficie de contacto del fluido

al estar con una mayor área superficial de contacto genero un aumento en la velocidad de incremento de temperatura, influyendo factores de radiación en un estado inicial en la superficie externa del tubo, transfiriendo por conducción hacia el material en el interior del concentrador. En el sistema se emplearon balines de cobre, balines de acero Bbs con un diámetro de 4.55 mm y una cantidad total de 1500 balines. En un siguiente ensayo se utilizaron rebabas de cobre de 1 mm de diámetro lo cual aumento considerablemente el área superficial. La Figura 3.6 muestra los materiales empleados para mejorar la eficiencia térmica del CPC.

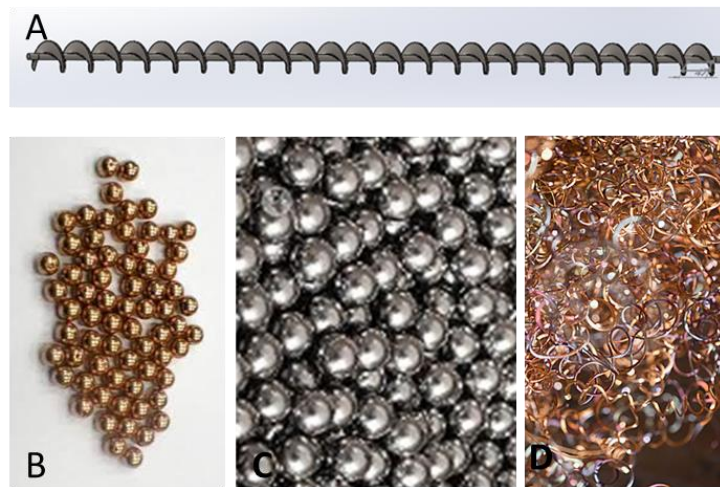


Figura 3.6. Granulometrias utilizadas dentro del tubo concentrador, A: Sinfín de acero galvanizado, B: balines de cobre, C: balines de acero Bbs, D: rebabas de cobre.

3.4.4 Funcionamiento experimental del CPC

El CPC conto con tres tubos concentradores a los cuales se incorporaron los materiales de prueba descritos en la Figura 3.6, se tuvo dispuesta agua pura en el tanque de almacenamiento 1, como se muestra en la Figura 3.2. Posteriormente se abrieron las válvulas señaladas con el punto 5 en la Figura 3.4, hasta llenar el tubo concentrador. Se cerraron las válvulas de paso y se inició con la rutina experimental activando las lámparas de alógeno de 500 W/m^2 y los datalogger contruidos y programados para registrar la temperatura cada minuto.

Se cambio al fluido de trabajo en el concentrador con cada ángulo de inclinación evaluado.

3.4.5 Diseño experimental

En esta fase se realizaron cinco pruebas con distinta granulometría: concentrador sin ninguna granulometría en su interior (Ap), concentrador con un sinfín de acero galvanizado en su interior (Sf), concentrador con un tornillo sinfín y 1500 balines de acero Bbs (4.5 mm) (Ba), concentrador con tornillo sinfín y 1500 balines de cobre (4.5 mm) (Cu) y concentrador con rebabas de cobre (Rc). Se condujeron rutinas de captación de energía radiante con fuente energética que consistió de lámparas de 500 W para simular radiación solar. Se identificó un tiempo característico de estudio de la operación (t_{est}) y la temperatura alcanzada hasta ese punto (T_{est}). En adición se determinó el calor absorbido en este periodo (Q_{abs}). Todas las rutinas se realizaron triplicado. Para determinar el calor absorbido (Q_{abs} , J/s) se aplicó un balance de energía con la forma de la Ecuación (3.9), donde m_{ag} es la masa (kg) del agua contenida en el sistema de colección de energía, ρ es densidad (kg/m^3), V es volumen del fluido (m^3), C_p es calor específico ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$) del agua, T_{ini} es la temperatura ($^\circ\text{C}$) inicial y T_{est} es la temperatura ($^\circ\text{C}$) de estudio alcanzada al tiempo de estudio (t_{est}) definido.

$$Q_{\text{abs}} = \frac{m_{\text{ag}} C_p (T_{\text{est}} - T_{\text{ini}})}{t_{\text{est}}} \quad (3.9)$$

3.4.6 Análisis de datos

El trabajo se realizó en forma congruente con un arreglo 5×4 , alojado en un diseño completamente al azar. Los datos de temperatura de estudio y calor absorbido se sometieron a análisis de varianza complementado con rutinas de comparación de medias realizados con apoyo del estadístico de Tukey, con nivel de significancia de 0.05. Todas las rutinas se realizaron por triplicado y el análisis de datos se realizó con el programa SAS (SAS Institute Inc., 1999).

3.5 Resultados y discusión

En el Cuadro 3.2, se muestran los resultados de área superficial de las distintas granulometrías y las temperaturas máximas alcanzadas en cada tratamiento.

Cuadro 3.2. Características de distintos rellenos usados en el colector de energía radiante.

Ensayo	Angulo de inclinación	Área superficial (m ²)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo (min)
Concentrador sin ninguna granulometría en su interior (testigo)	45	0.1436	71	230
	40		76	221
	35		79	246
	30		80	235
Concentrador con un Sinfín de acero galvanizado	45	0.6406	84.75	195
	40		86.5	192
	35		87.75	186
	30		89.5	183
Concentrador con un sinfín balines de acero Bbs	45	0.7360	92	162
	40		93	165
	35		93.75	163
	30		94.5	159
Concentrador con sinfín y balines de cobre	45	0.7360	91.25	167
	40		92	172
	35		93.75	169
	30		94	165
Rebabas de cobre de 1 mm de diámetro	45	0.8264	93.25	168
	40		94.35	166
	35		95.25	165
	30		96.1	159

Se observa en el Cuadro 3.2 que el fluido de trabajo adicionando los distintos materiales y diferentes granulometrías el aumento de temperatura es mayor en un intervalo de tiempo menor al del tratamiento con agua pura en todos los ángulos ensayados, se observa también que el aumento de área superficial de contacto y el material adicionado influye en la eficiencia térmica del sistema colector, siendo el tratamiento de rebabas de cobre el que logra superar la temperatura de ebullición en todos los ángulos de inclinación siendo la máxima 96.1 °C en un tiempo de 159 minutos con un ángulo de inclinación de 30°, los tratamientos con la adición de sinfín y balines de cobre y acero Bbs también superan la temperatura de ebullición en los ángulos de 30°, 35° y 30° 35° y 40 ° respectivamente, pero en un tiempo mayor al tratamiento con rebabas de cobre, los tratamientos de agua pura y sinfín no rebasan la temperatura de ebullición en ninguno de los ángulos de inclinación.

Los gráficos de la Figura 3.7, muestran las diferentes temperaturas alcanzadas en los distintos ángulos y con los distintos materiales adicionados. Se puede observar que ningún tratamiento rebaso la temperatura de ebullición en el tiempo característico de estudio de la operación (t_{test}), siendo el tratamiento de rebabas de cobre el que más se acerca al alcanzar una temperatura de 88.5 °C con un ángulo de inclinación de 30°, seguido del tratamiento de tornillo sinfín con balines de cobre, que alcanza una temperatura de 83.5 °C con un ángulo de inclinación de 30°, con una temperatura cercana esta el tratamiento de tornillo sinfín con balines de acero Bbs que llega a una temperatura de 83.25 °C con el mismo ángulo de inclinación. Se observó también que conforme el ángulo de inclinación aumento la temperatura alcanzada disminuyó en todos los tratamientos, la variación de esta entre los diferentes ángulos de inclinación osciló con una diferencia de 3 °C entre cada ángulo de inclinación.

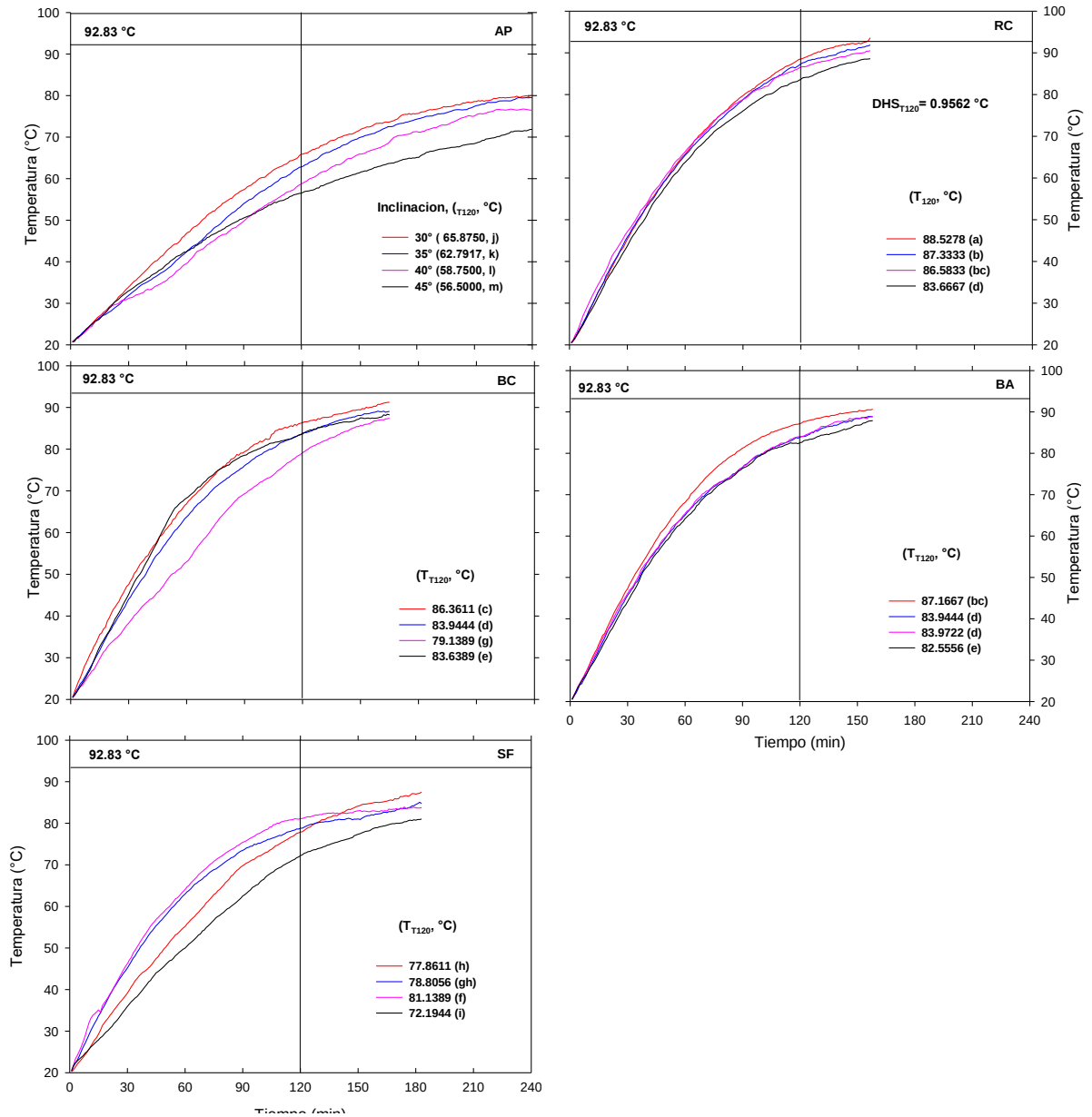


Figura 3.7. Variación de la temperatura en función del tiempo del fluido de proceso formado por agua pura (Ap) con tornillo sinfín dentro del concentrador (Sf), tornillo sinfín con balines de cobre (Bc), tornillo sinfín con balines de acero Bbs (Ba) y rebabas de cobre (Rc); T_{120} es temperatura alcanzada a después de 120 min de calentamiento. DSH: diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). La constante 92.83 °C corresponde a la temperatura de ebullición del agua a 77.993 kPa. Letras diferentes asociadas a T_{120} indican diferencia significativa en este parámetro.

Cuadro 3.3. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) con valores ($\alpha=0.05$) y valores de F correspondientes al análisis de varianza de la evaluación de la operación del colector parabólico compuesto (CPC) afectado por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación.

Factor de variación					
Variable	Fluido (F)	Inclina (I)	F×I	Error	C.V. (%)
gl	4	3	12	36	--.--
$F_{0.05}$	2.4085	2.7981	1.8802	--.--	--.--
Variables respuesta					
T_{120}	4762.70 *	551.33 *	56.91 *	--.--	0.6017
Q_{abs}	4702.38 *	521.45 *	58.03 *	--.--	0.8079

Fluido: factor de variación dado por el tipo de fluido de proceso; Inclina: factor de variación dado por la inclinación del colector; F×I: interacción entre los factores tipo de fluido e inclinación; gl: grados de libertad, C.V.: coeficiente de variación, T_{120} : temperatura a los 120 min de operación; Q_{abs} : calor absorbido. El símbolo * indica que al menos un nivel dentro del factor de variación produjo un efecto diferente en relación con el resto ($\alpha = 0.05$). El símbolo * indica que hubo significancia en el efecto ($\alpha = 0.05$) causado entre niveles dentro del factor de variación.

El análisis de varianza nos indica que hay diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las distintas pruebas con adición de diferentes granulometrías. La prueba de medias de diferencia significativa (Tukey, 0.05), nos muestra que el mejor tratamiento es el de rebabas de cobre con una media de 86.5 °C a los 120 min y un calor absorbido de 67.89 J, los tratamientos que obtienen resultados temperaturas cercanas a la ebullición al tiempo característico de estudio de la operación (t_{test}) son el adicionado con el sinfín y balines de cobre y acero Bbs alcanzando temperaturas de 82.25 °C y 84.40 °C y el calor absorbido en este periodo (Q_{abs}) fue de 57.16 J y 64.56 J respectivamente.

Cuadro 3.4. Comparación de medias de la operación de un colector parabólico compuesto afectada por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación del sistema.

FV	T ₁₂₀	Q _{abs} (J)
<u>Tipo de relleno</u>		
Ap	60.9896 (1.0902) e	41.6183(1.1055) e
Rc	86.5278(0.5427) a	67.8887(0.5480) a
Sf	77.5000(0.6754) d	51.1055 (0.6534) d
Bc	83.2500(0.7890) c	57.1564(0.8765) c
Ba	84.4097(0.3218) b	64.5945(0.2265) b
DSH	0.3243	0.4327
<u>Ángulo de inclinación</u>		
30°	81.1583(1.2175) a	62.8675(1.2673) a
35°	79.3472(1.6783) b	58.7656 (1.7853) b
40°	77.9167 (1.8735) c	52.7643 (1.8745) c
45°	77.1111(1.5423) d	52.2102 (1.7535) d
DSH	0.3026	0.3472

FV: factor de variación; T₁₂₀: temperatura a los 120 min de operación; Q_{abs}: calor absorbido; Ap: agua pura; Rc: agua con rebabas de cobre; Sf: agua con Sinfin; Bc: agua con sinfín y balines de cobre; Ba: agua con sinfín y balines de acero Bbs; DSH: diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, 0.05). Los valores entre paréntesis representan errores estándar.

La comparación de medias indico que hubo diferencias significativas entre los ángulos de inclinación, siendo el ángulo de 30° el que obtiene la temperatura más alta al tiempo característico de estudio de la operación (t_{test}) pero sin llegar a la temperatura de ebullición alcanzando un valor de 81.15 °C seguido del ángulo de 35°, 40° y 45° con temperaturas de 79.39 °C, 77.9 °C y 77.11 °C respectivamente, mientras que para el calor absorbido al tiempo característico de estudio de la operación (t_{test}) el mejor ángulo es el de 30° de inclinación teniendo un valor de 62.86 J, seguido de los ángulos de 35°, 40° y 45° de inclinación con valores de 58.7 J, 52.7 J y 52.2 J respectivamente.

3.7 Conclusiones

Los resultados muestran que al aumentar la superficie de contacto del fluido con los materiales adicionados al concentrador el intervalo de tiempo para lograr una ebullición fue menor en los tratamientos que usaron tornillo sinfín, balines de

cobre, balines de acero Bbs y rebabas de cobre, siendo este último el mejor tratamiento al llegar a una temperatura de 96.25 °C en un tiempo aproximado de 159 min con un ángulo de 30° de inclinación. Analizando los datos a un tiempo estimado de 120 min y obteniendo los resultados de calor absorbido, el tratamiento con mejores resultados fue el de rebabas de cobre, muy por encima de la media de los otros tratamientos; sin embargo, no alcanzo la temperatura de ebullición.

3.8 Literatura citada

- Abdollahpour, A., Ahmadi, M. H., & Mohammadi, A. H. (2014). Thermodynamic model to study a solar collector for its application to Stirling engines. *Energy Conversion and Management*, 79, 666-673. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.039>
- Alanne, K., & Saari, A. (2006). Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(6), 539-558.
- Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2015). A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). *Energy Conversion and Management*, 106, 268-281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>
- Bellas, D. V., & Lidorikis, E. (2017). Design of high-temperature solar-selective coatings for application in solar collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 170, 102-113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.056>
- 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.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- Panwar, N., Kaushik, S., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.
- Patil, R. G., Panse, S. V., & Joshi, J. B. (2014). Optimization of non-evacuated receiver of solar collector having non-uniform temperature distribution for minimum heat loss. *Energy Conversion and Management*, 85, 70-84.
- Singh, H., & Eames, P. C. (2011). A review of natural convective heat transfer correlations in rectangular cross-section cavities and their potential applications to compound parabolic concentrating (CPC) solar collector

cavities. *Applied Thermal Engineering*, 31(14), 2186-2196.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.032>

CAPÍTULO 4. SISTEMA DE COLECCIÓN DE ENERGÍA RADIANTE INCORPORADO CON NANOPARTÍCULAS

4.1 Resumen

La demanda energética mundial ha crecido con el aumento demográfico en décadas recientes. El agotamiento de fuentes de energía fósiles ha generado la búsqueda de alternativas sustentables e innovadoras de fuentes de energía. Es por ello que se desarrolló la siguiente investigación en la cual se utiliza un colector parabólico compuesto (CPC) como sistema de captación de energía. La experimentación se realizó evaluando distintos fluidos de trabajo, se adicionaron nanopartículas de plata, nanopartículas de cobre, tinta china y carbón activado en una concentración de 0.05 % de la masa total del fluido, utilizando agua pura como testigo. Los resultados obtenidos de acuerdo a los factores de análisis, ángulo de inclinación del sistema colector con cuatro niveles (30, 35, 40 y 45°) y el fluido de trabajo, tomando como variables respuesta, a la temperatura alcanzada a los 120 min (T_{120}), calor absorbido (J_{abs}), temperatura de pared (T_p) y el coeficiente convectivo interno (h_i), se sometieron a análisis de varianza y a pruebas de comparación de medias de tratamiento mediante el estadístico de Tukey con nivel de significancia de 0.05. El experimento mostró que el tratamiento con nanopartículas de plata obtuvo los mejores resultados, siendo (T_{120}) de 85.67 °C, (Q_{abs}) de 66.67 J, (T_p) de 97 °C y (h_i) de 5.24 W/m² °C, con un ángulo de inclinación de 30°. Dentro de todos los tratamientos el manejo con tinta china en una inclinación de 30° mostró mejores resultados que la media de las nanopartículas de plata. El uso de nanopartículas metálicas y no metálicas causó mejora de la eficiencia de operación del CPC.

Palabras clave: nanopartículas, fluido de trabajo, coeficiente convectivo, temperatura de pared,

SOLAR ENERGY COLLECTION SYSTEM INCORPORATED WITH NANOPARTICLES

4.2 Abstract

The global energy demand has grown with the demographic increase in recent decades, the depletion of fossil energy sources has generated the search for sustainable and innovative alternatives of energy sources. That is why the following research was developed in which a composite parabolic collector (CPC) is used as an energy capture system. The experimentation was carried out evaluating different working fluids, silver nanoparticles, copper nanoparticles, Indian ink and activated carbon were added in a concentration of 0.05% of the total mass of the fluid, using pure water as a control. The results obtained according to the analysis factors, angle of inclination of the collector system with four levels (30, 35, 40 and 45 °) and the working fluid, the response variables being the temperature reached at 120 min (T_{120}), absorbed heat (Q_{abs}), wall temperature (T_p) and the internal convective coefficient (h_i), were subjected to analysis of variance and comparison tests of treatment means using the Tukey statistic with significance level of 0.05. The experiment showed that the treatment with silver nanoparticles obtained the best results, being (T_{120}) of 85.6667 ° C, (Q_{abs}) of 66.5945 J, (T_p) of 97 ° C and (h_i) of 5.2397 W / m² ° C, with an angle of inclination of 30 °, inside all the treatments and repetitions made the treatment with Indian ink in an inclinations 30 degrees shows better results than the average of the silver nanoparticles. It can be concluded that there is an improvement in the efficiency of the CPC system by adding metallic and non-metallic nanoparticles.

Keywords: nanoparticles, working fluid, convective coefficient, wall temperature,

Thesis of Master Science, Program of Agricultural Engineering and Integral Use of Water.
Universidad Autónoma Chapingo, México.

Author: Eder Reyes Cortés

Thesis Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

4.3 Introducción

La escasez de energía y la crisis ecológica son cada vez más graves; por lo tanto, el desarrollo y la utilización de nuevas formas de energía son inminentes y estos hechos apuntan al uso de la energía solar como una alternativa importante (Wang et al., 2018). La energía solar está teniendo gran popularidad en las recientes décadas en múltiples aplicaciones industriales. Es una alternativa para generar electricidad (Lewis et al., 2007), productos químicos (Steinfeld, 2005) o calefacción (Panwar et al., 2011). El vapor es uno de los fluidos de servicio de más amplio uso en la industria y con pocas excepciones como la generación de vapor en los ingenios azucareros a partir de bagazo de caña (Debernardi-De La Vequia et al., 2016), la industria generalmente usa combustibles fósiles o calefacción con electricidad para producirlo (Elimelech et al., 2011). A nivel de casa habitación es cada vez más frecuente observar el uso de sistemas de colecta de energía solar para obtener agua caliente, con requerimientos menos demandantes, pues la temperatura objetivo en el fluido es normalmente menor a 40 °C. Actualmente hay un fuerte interés para generar vapor o producir agua caliente utilizando energía solar y por ello se están realizando importantes esfuerzos para coleccionar la energía utilizando concentradores (Gea et al., 2007; Xu et al., 2015) y para almacenarla (Gea et al., 2009). En años recientes se ha demostrado que la generación de vapor a base de energía solar puede mejorarse significativamente mediante el uso de nanopartículas metálicas (Fang et al., 2013; Neumann et al., 2013; Ni et al., 2015). Incluso se ha mostrado que el nanomaterial utilizado no requiere tener estrictamente una base metálica, pues se ha usado tinta china como nanofluido para la generación de vapor mediante energía solar (Wang et al., 2018), lo cual sugiere que podrían usarse otros materiales como el carbón activado. Hasta ahora, estudios como los mencionados han estado enfocados de manera simple a la variación de temperatura en un fluido receptor, pero no hay aún trabajos que permitan simular los sistemas con base en coeficientes individuales o globales de transferencia de calor y tampoco se ha estudiado el efecto del área superficial de materiales de relleno en sistemas de generación solar de fluidos de calefacción. En tal contexto,

el presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la incorporación de partículas de distinta granulometría en el fluido de proceso de un colector parabólico compuesto sobre la capacidad de colección de energía radiante en este tipo de sistemas.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Materiales

Estructura metálica de 1.5 plg, tubo de cobre de 2 plg, acero inoxidable 430 BA (tipo espejo), madera, lámparas de 500 W, termopares tipo K, sistema de adquisición de datos, rebabas de cobre, nanopartículas metálicas, tinta china, carbón activado, herramientas diversas.

4.4.2 Colector solar parabólico

Se construyó un sistema de colección de energía radiante con la estructura mostrada en las Figura 4.1 y 4.2, así como en el Cuadro 4.1, con capacidad de ser girado a ángulos de 30, 35, 40 y 45° en relación a la fuente radiante.

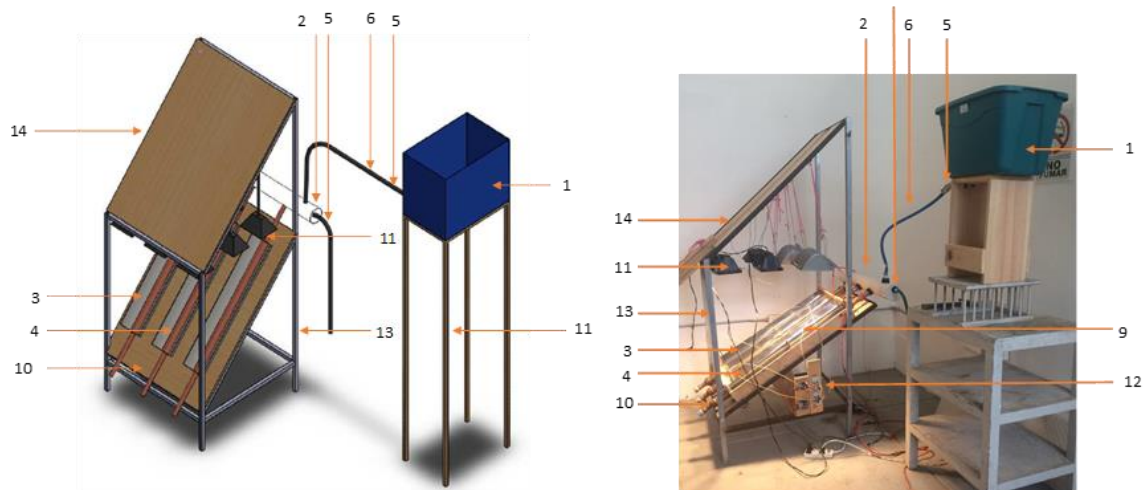


Figura 4.1. Sistema de colección de energía radiante diseñado en SolidWorks®, vista frontal (A), estructura del sistema de colección de energía radiante real (B). La notación se describe en el cuadro 4.1.

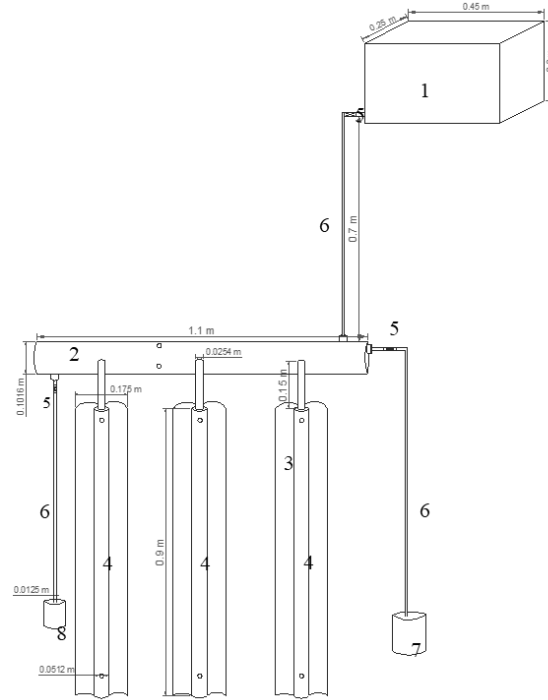


Figura 4.2. Sistema experimental de colección de energía radiante. La notación se describe en el Cuadro 4.1.

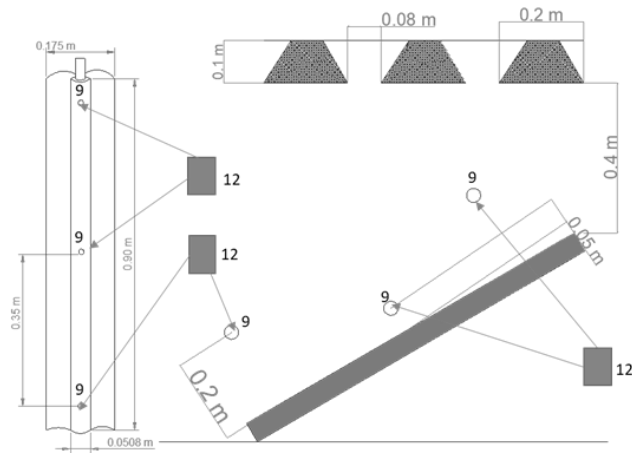


Figura 4.3. Sistema de radiación térmica y localización de termopares en el espacio libre entre el CPC y el sistema de iluminación. La notación se describe en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Notación e identificación de componentes del colector parabólico compuesto.

Identificador	Descripción
1	Recipiente de plástico de 0.45 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.35 m de alto
2	Tubo de CPVC con un diámetro de 0.1016 m y longitud de 1.1 m .
3	Acero inoxidable 430 BA (tipo espejo), se construyeron las involutas con una longitud de 0.94 m y un ancho de 0.17 m.
4	Tubo de cobre con un diámetro de 0.0508 m y longitud de 1.2 m, de los cuales solo 0.9 m fueron evaluados en el sistema.
5	Válvulas de paso con un diámetro de 0.0190 m.
6	Mangueras de plástico con un diámetro de 0.0190 m.
7	Recipiente de plástico con un diámetro de 0.15 m y longitud de 0.2 m.
8	Recipiente de plástico con un diámetro de 0.15 m y longitud de 0.2 m.
9	Termopares tipo K con un rango de medición de – 15 a 350 °C.
10	Tubo de cobre con un diámetro de 0.0254 m.
11	Reflectores de alógeno con una potencia de 500 W.
12	Data logger con sistema Arduino UNO.
13	PTR de 1.5 plg
14	Madera de 0.86 m de largo, 0.85 m de ancho y espesor de 0.5 plg.

El sistema se instrumentó con termopares tipo K, conectados a una tarjeta Arduino UNO y una Data Shield. Se desarrolló un código de programación (Anexo 1), con las librerías; "max6675.h" (módulo para convertir los valores binarios del termopar tipo K a ° C), <Wire.h> (permite el almacenamiento de datos en un archivo "txt"), "RTCLib.h" (modulo reloj, permite la programación del intervalo de tiempo de registro de datos), <SPI.h> (permite la lectura del Arduino UNO de la Data Shield), <SD.h> (permite el almacenamiento de datos en una tarjeta SD).

Los termopares en el tubo concentrador fueron colocados a una distancia de 0.125 m del inicio del tubo y 0.125 m antes del final del tubo, para poder determinar la diferencia de temperatura del fluido de trabajo dentro del concentrador, el registro de temperatura fue cada minuto en todos los ensayos. Los termopares en el tanque de almacenamiento del CPC fueron colocados en la parte inferior y superior de éste como se muestra en la Figura 4.1. El registro de temperatura se realizó cada 5 min. Los termopares colocados en el espacio entre el colector y los reflectores estuvieron a una distancia de 0.2 m (T1 y T2), 0.05 m (T3) y también el registro de temperatura se realizó cada 5 min.

4.4.3 Organización experimental

Se evaluó la operación del sistema de colección de energía radiante utilizando agua pura (Ap) como fluido de proceso y también con la incorporación de cuatro materiales consistentes en carbón activado (Ca), tinta china (Tc), nanopartículas de plata (Np), nanopartículas de cobre (Nc), en concentración de 0.05 % (Wang et al. (2018) y rebabas de cobre (Rc) en cantidad de $0.75\text{ kg/kg}_{\text{agua}}$. Se condujeron rutinas de captación de energía radiante con fuente energética que consistió de lámparas de 500 W para simular radiación solar. Se identificó un tiempo característico de estudio de la operación (t_{est}) y la temperatura alcanzada hasta ese punto (T_{est}). En adición, se determinó el calor absorbido en este periodo (Q_{abs}), la temperatura de la pared interna del tubo contenedor (T_p) y el coeficiente de convección térmica interno (h_i). Todas las rutinas se realizaron triplicado.

4.4.4 Tamaño de partícula

Se evaluó el diámetro de las partículas que fueron incorporadas al fluido de proceso mediante un microscopio electrónico de transmisión (FEI Tecnai G2 Spirit MIC-E-004, Australia). Se diluyó una pequeña muestra en agua destilada. Con ayuda de un agitador se procedió a homogeneizar la dilución obtenida, con el fin de tratar de separar las partículas y poder realizar la observación. Posteriormente, se colocó una microgota de la suspensión directamente en una rejilla de cobre para su observación en el microscopio.

4.4.5 Estudio de la transferencia de calor

Se utilizó una ecuación de Antoine (Ecuación 4.1; Felder y Rosseau, 2004) para determinar la temperatura de ebullición del agua (T_{ebull}) a la presión del lugar de experimentación (Chapingo, México; $P_{\text{atm}}=585$ mmHg).

$$\log(P_{\text{atm}}, \text{ mmHg}) = 7.96681 - \frac{1668.21}{(T_{\text{ebull}}, ^\circ\text{C}) + 228} \quad (4.1)$$

Los datos de cambio de temperatura de cada rutina experimental se graficaron en función del tiempo. Entre los distintos sistemas se identificó aquél cuya temperatura rebasó la T_{ebull} y se determinó el tiempo mínimo en alcanzar un valor cercano, pero menor a ella y la temperatura correspondiente a ese tiempo en todas las corridas, los cuales se consideraron como tiempo y temperatura de estudio (t_{est} , T_{est}), respectivamente. Para determinar el calor absorbido (Q_{abs} , J/s) se aplicó un balance de energía con la forma de la Ecuación (4.2), donde m_{ag} es la masa (kg) del agua contenida en el sistema de colección solar, definida en términos de la Ecuación (4.3), ρ es densidad (kg/m^3), V es volumen del fluido (m^3), C_p es calor específico ($\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$) del agua, T_{ini} es la temperatura ($^\circ\text{C}$) inicial y T_{est} es la temperatura ($^\circ\text{C}$) de estudio alcanzada al tiempo de estudio (t_{est}) definido. Asimismo, se consultaron datos de ρ y C_p de la literatura en función de la temperatura (Geankoplis, 2003) y mediante regresión se ajustaron a modelos con la forma de las Ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$Q_{\text{abs}} = \frac{m_{\text{ag}} C_p (T_{\text{est}} - T_{\text{ini}})}{t_{\text{est}}} \quad (4.2)$$

$$m_{\text{ag}} = \rho V \quad (4.3)$$

$$\rho = 1000.544056 - 0.069694 T + 0.003568 T^2 \quad (4.4)$$

$$C_p = 4.216663 - 0.002195 T + (3.5742 \times 10^{-5}) T^2 - (1.3693 \times 10^{-7}) T^3 \quad (4.5)$$

Para determinar la temperatura de la pared interna (T_P) y el coeficiente de convección térmica interno (h_i) se desarrolló un balance de energía en régimen transitorio. Para ello, se consideraron los sistemas tubulares de colección de energía radiante mostrados en la Figura 4.1, que se caracterizaron por tener longitud (L , m), diámetro interno (D_i , m) y masa de agua contenida (m_{ag} , kg). Considerando como sistema el fluido de proceso (agua) contenido en el tubo colector, la Ecuación (4.6) describe el balance de energía, donde E es contenido de energía (J), t es tiempo (s), E_e es flujo de entrada de energía (W) y E_s es flujo de salida de energía (W).

$$E_e - E_s = \frac{dE}{dt} \quad (4.6)$$

Se reconoció que la lámparas radiantes causaron la elevación de la temperatura de la pared de la tubería hasta un valor T_P ($^{\circ}\text{C}$) y desde allí se transfirió calor por un mecanismo de convección hacia el fluido de proceso, con un flujo (W) que tuvo la magnitud descrita por la Ecuación (4.7), donde h_i es el coeficiente de convección interno ($\text{J/s m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), A_i es el área superficial interna (m^2) y T_F es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio del fluido de proceso en un tiempo dado.

$$E_e = Q_e = h_i A_i (T_P - T_F) \quad (4.7)$$

Por otro lado, en virtud de que la temperatura de pared fue mayor que la del fluido de proceso ($T_P > T_F$), se aceptó que no podía haber pérdida de energía desde el fluido, es decir que ($E_s = 0$). Asimismo, la variación de la energía del mismo fluido de proceso, en situación donde sólo ocurrió cambio de temperatura sin cambio de fase por evaporación, se describió en la forma de la Ecuación (4.8).

$$\frac{dE}{dt} = m_{ag} C_p \frac{dT_F}{dt} \quad (4.8)$$

Con estos criterios, la Ecuación (4.6) se reescribió en la forma de la Ecuación (4.9) y tras un reordenamiento se obtuvo la Ecuación (4.10).

$$h_i A_i (T_P - T_F) = m_{ag} C_p \frac{dT_F}{dt} \quad (4.9)$$

$$\frac{dT_F}{dt} + \left(\frac{h_i A_i}{m_{ag} C_p} \right) T_F = \left(\frac{h_i A_i}{m_{ag} C_p} \right) T_P \quad (4.10)$$

A partir de la Ecuación (4.10) se definió un coeficiente de calefacción (b ; s^{-1}) en la forma de la Ecuación (4.11), con lo cual la Ecuación (4.10) se simplificó en la forma de la Ecuación (4.12).

$$b = \frac{h_i A_i}{m_{ag} C_p} \quad (4.11)$$

$$\frac{dT_F}{dt} + b T_F = b T_P \quad (4.12)$$

La Ecuación (4.12) es una ecuación diferencial lineal de primer orden de coeficientes constantes, cuya solución se realizó a través del uso de un factor integrante (F) con la forma de la Ecuación (4.13).

$$F = e^{\int b dt} = e^{bt} \quad (4.13)$$

La Ecuación (4.12) se multiplicó por F y con el procedimiento descrito en la Ecuación (4.14) se obtuvo la Ecuación (4.15) donde C es una constante de integración.

$$\left[e^{bt} \frac{dT_F}{dt} + e^{bt} b T_F = e^{bt} b T_P \right] \Rightarrow \left[\frac{d(e^{bt} T_F)}{dt} = e^{bt} b T_P \right] \Rightarrow \left[e^{bt} T_F = b T_P \int e^{bt} dt + C \right] \quad (4.14)$$

$$T_F = T_P + C e^{-bt} \quad (4.15)$$

Para evaluar la constante de integración (C) se consideró que al tiempo cero ($t=0$), la temperatura del fluido de proceso era ($T_F = T_0$). En tal sentido, se obtuvo que ($C=T_0 - T_P$), con lo cual se obtuvo la Ecuación (4.16).

$$T_F = T_P + (T_0 - T_P) e^{-bt} \quad (4.16)$$

En el lado derecho de la Ecuación (4.16) se sumó y se restó T_0 y tras un ordenamiento se obtuvo la Ecuación (4.17), que se expresó en forma simplificada en la forma de la Ecuación (4.18), donde se definió la constante a en la forma de la Ecuación (4.19).

$$T_F = T_0 + (T_P - T_0)(1 - e^{-bt}) \quad (4.17)$$

$$T_F = T_0 + a(1 - e^{-bt}) \quad (4.18)$$

$$a = T_P - T_0 \quad (4.19)$$

Los datos experimentales de cada rutina experimental se sometieron a una rutina de regresión no lineal con apoyo del programa Sigma Plot (SPSS, 2000) para ajustarlos a un modelo con la forma de la Ecuación (4.18), donde T_0 (°C), a (°C) y b (s^{-1}) se obtuvieron como constantes de regresión.

Para determinar el coeficiente de convección interno (h_i) y la temperatura de la superficie interna de la pared del sistema (T_P), la Ecuación (4.18) se expresó de manera explícita para el tiempo, en la forma mostrada por la Ecuación (4.20).

$$t = \left(\frac{1}{b} \right) \ln \left(\frac{a}{a + T_0 - T_F} \right) \quad (4.20)$$

Con la consideración de las Ecuaciones (4.11) y (4.19), la Ecuación (4.20) se expresó también en la forma de la Ecuación (4.21).

$$t = \left(\frac{m_{ag} C_p}{h_i A} \right) \ln \left(\frac{T_P - T_0}{T_P - T_F} \right) \quad (4.21)$$

Los parámetros buscados (h_i , T_P) se evaluaron con el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales (función *lsqnonlin.m*) disponible en la caja de herramientas de optimización de Matlab® (The Mathworks Inc., 1990-2008). La función se aplicó con la sintaxis descrita en la Ecuación (4.22) para encontrar los mejores valores de h_i y T_P , denotados como $x(1)$ y $x(2)$, respectivamente, de forma que la Ecuación (4.21) reprodujera el comportamiento experimental representado por la Ecuación (4.20).

$$\begin{aligned} T_F &= \text{linspace}(T_{inf}, T_{sup}); \quad t = -(1/b_{reg}) * \log(-(T_F .* (1) - \text{foregate}) / a_{reg}); \\ \text{fun} &= @(x) (-m_{ag} C_p) / (x(1) A) * \log((x(2) - T_t) / (x(2) - T_{inf})) - t; \\ lb &= [0, 0]; \quad x_0 = [300, 100]; \\ x &= \text{lsqnonlin}(\text{fun}, x_0, [lb,], [], \text{options}) \end{aligned} \quad (4.22)$$

La variable x_0 definió el conjunto de condiciones iniciales propuestas requeridas por la función *lsqnonlin.m* para realizar la calibración de $x(1)$ y $x(2)$. La variable lb estableció que los parámetros buscados no podían ser negativos. El corchete vacío indicó que no había límite superior fijado para $x(1)$ y $x(2)$. En adición, la rutina se desarrolló considerando, como opciones (*options*), un número máximo de iteraciones de 2000 y una tolerancia mínima en la función de 1×10^{-5} , de forma que el valor óptimo fue encontrado cuando el cambio relativo de la búsqueda en la dirección del eje de abscisas fue menor a esta referencia.

4.4.6 Análisis de datos

Esta fase se realizó en forma congruente con un arreglo factorial 4×6 , alojado en un diseño completamente al azar, donde uno de los factores fue el ángulo de inclinación del sistema colector con cuatro niveles (30, 35, 40 y 45°) y el otro el fluido de proceso con seis niveles, tipificados por agua pura (Ap), suspensión de carbón activado (Ca), suspensión de tinta china (Tc), suspensión de

nanopartículas de plata (Np), suspensión con nanopartículas de cobre (Nc) y suspensión de rebabas de cobre (Rc). Los datos de temperatura alcanzada al tiempo de estudio (T_{est} a t_{est}), calor absorbido (Q_{abs}) al tiempo t_{est} , temperatura de pared (T_P) y coeficiente de convección térmica interno (h_i) se sometieron a análisis de varianza y a pruebas de comparación de medias de tratamiento mediante el estadístico de Tukey, con nivel de significancia de 0.05. Todos los análisis se realizaron con el programa SAS (SAS Institute Inc., 1999).

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Fluidos de proceso

Se evaluó la operación de un sistema de colección de energía radiante con fluido de proceso formado por agua pura y con la incorporación de distintas partículas, consistentes de rebabas de cobre, carbón activado (Ca), tinta china (Tc), nanopartículas de plata (Np) y nanopartículas de cobre (Nc). A través de la observación mediante microscopía electrónica de transmisión se determinó que las partículas tuvieron forma aproximadamente esférica (Figura 4.3). Asimismo, las partículas de Ca tuvieron diámetros de $102.2 (\pm 20.1)$, las de Tc $198.4 (\pm 17.6)$, las de Np $1833.3 (\pm 297.6)$ nm y las de Nc $160.1 (\pm 54.1)$ nm (Figura 4.4) encontrándose estos diámetros en la media de estudios con nanopartículas que rondan de los 20-800 nm (Lee et al., 2012; Mehrali et al., 2015; Wang et al., 2018b; Zhang et al., 2014).

La operación del sistema de colección de energía radiante se evaluó a través de la variación de la temperatura del fluido de proceso, el calor absorbido por éste, la temperatura alcanzada por la superficie que estuvo en contacto con el fluido y el coeficiente de convección térmica interno. Todas las variables se afectaron de forma significativa ($p \leq 0.05$) por el tipo de fluido de proceso utilizado y por el ángulo de inclinación durante la exposición a la fuente de energía. Asimismo, se identificó interacción significativa ($p \leq 0.05$) entre los dos factores de variación evaluados (Cuadro 4.1).

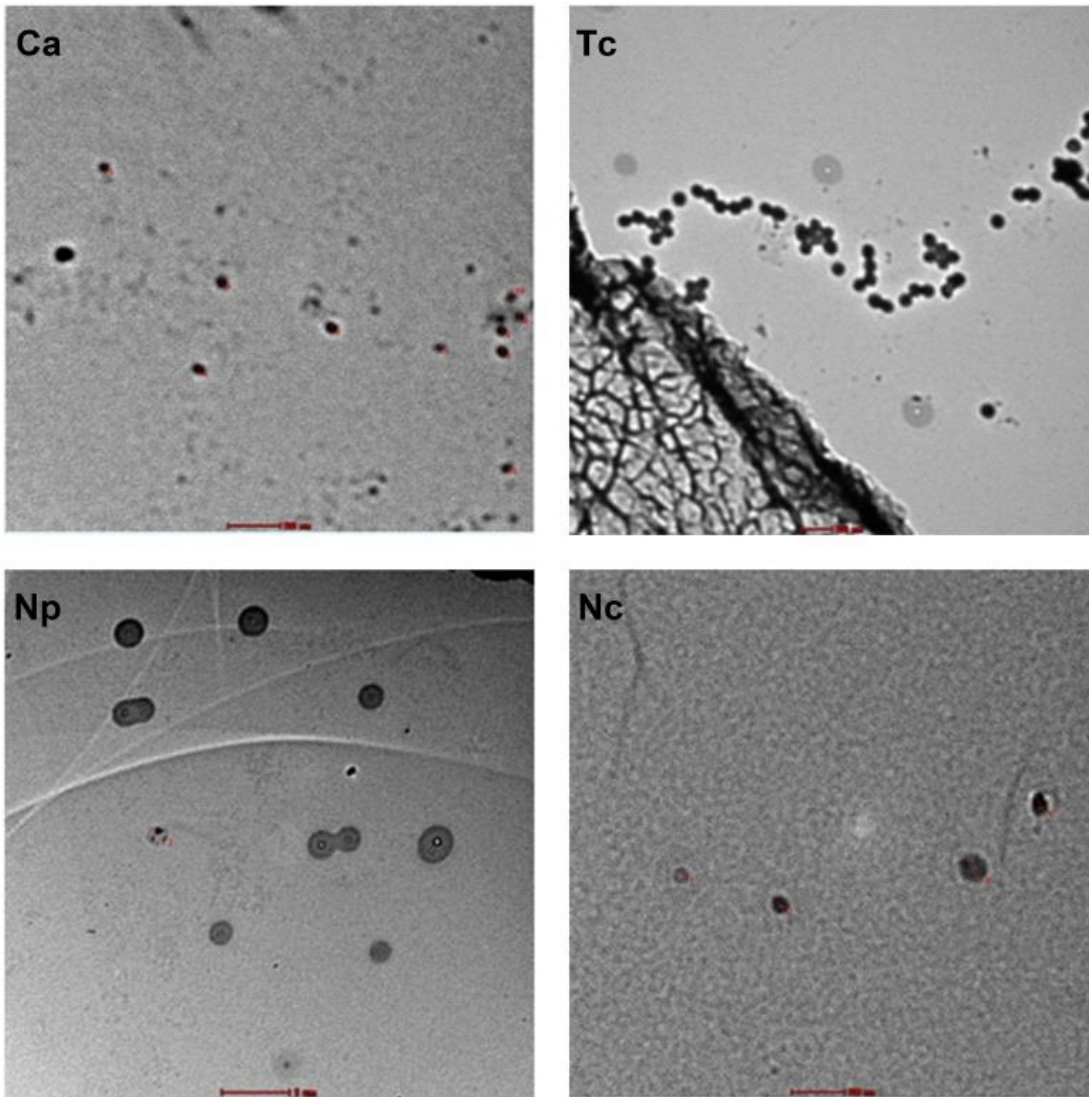


Figura 4.4. Apariencia de partículas incorporadas en el fluido de proceso del sistema de colección de energía radiante. Ca: carbón activado; Tc: tinta china; Np: nanopartículas de plata; Nc: nanopartículas de cobre. Las líneas de referencia corresponden a 500 nm en Ca, 500 nm en Tc, 5μm en Np y 500 nm en Nc.

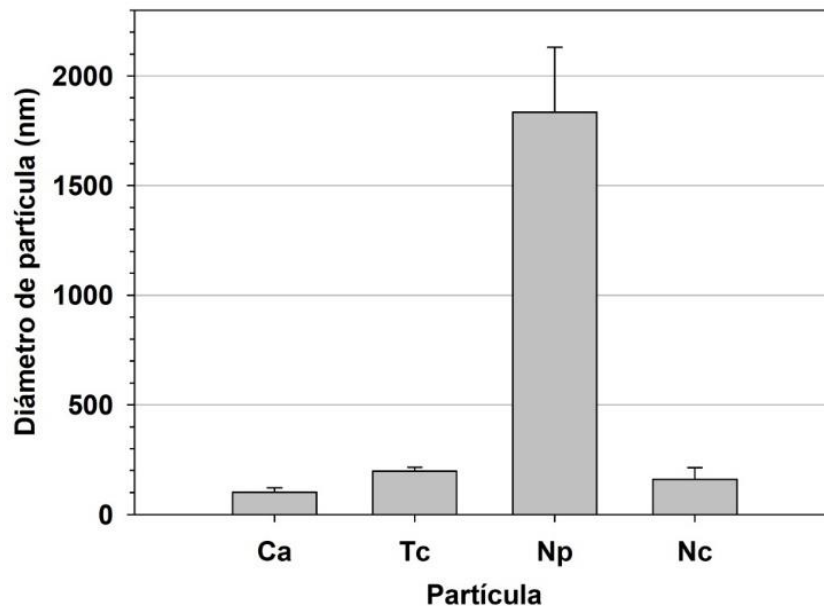


Figura 4.5. Diámetro de partículas incorporadas al fluido de proceso del sistema de colección de energía radiante. Ca: carbón activado; Tc: tinta china; Np: nanopartículas de plata; Nc: nanopartículas de cobre. Las barras de error corresponden a desviación estándar.

4.5.2 Variación de la temperatura

Wang et al. (2018) y Chen et al. (2017), han realizado experimentos con una radiación de 300 y 700 W respectivamente obteniendo un calentamiento del fluido uniforme, mientras que la exposición del sistema colector a la radiación emitida por las lámparas de 500 W propició el calentamiento del fluido de proceso de forma rápida al inicio, pero con tasa más lenta al paso del tiempo en la mayoría de las rutinas experimentales (Figura 4.3). Este comportamiento era esperado y fue congruente con un proceso de calentamiento de un material que almacena energía calorífica en régimen transitorio (Valle-Guadarrama et al., 2007). El calor recibido por el fluido de proceso proviene de la superficie metálica interna del tubo contenedor y la magnitud del flujo energético es función de la magnitud del gradiente de temperatura entre el fluido y la superficie. A medida que se incrementa la temperatura del fluido, el gradiente de temperatura se reduce y ello causa que el flujo de calor ocurra a menor velocidad, lo cual causa que el cambio de temperatura también ocurra a menor tasa.

De acuerdo con la Ecuación (4.1), la temperatura de ebullición del agua pura a la presión atmosférica del lugar de experimentación (77.993 kPa; Chapingo, México) es de 92.83 °C. Entre los distintos sistemas, el que alcanzó esta condición en menor tiempo correspondió al que usó como fluido de proceso agua incorporada con tinta china y con ángulo de inclinación de 30°, lo cual ocurrió a los 128 min de exposición a la radiación térmica. En tal sentido, se consideró el tiempo de 120 min como tiempo de estudio de proceso ($t_{est} = t_{120}$), con objeto de usar la condición de cambio de temperatura sin cambio de fase como base para evaluar el comportamiento del sistema de colección de energía radiante

Cuadro 4.2. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) con valores ($\alpha=0.05$) y valores de F correspondientes al análisis de varianza de la evaluación de la operación del colector parabólico compuesto (CPC) afectado por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación.

Variable	Factor de variación			Error	C.V. (%)
	Fluido (F)	Inclina (I)	F×I		
Gl	5	3	15	48	--,--
$F_{0.05}$	2.4085	2.7981	1.8802	--,--	--,--
Variables de operación del colector					
T_{120}	4762.70 *	551.33 *	56.91 *	--,--	0.6017
Q_{abs}	4702.38 *	521.45 *	58.03 *	--,--	0.8079
T_P	592.26 *	18.96 *	22.98 *	--,--	1.5866
h_i	161.06 *	72.91 *	33.77 *	--,--	5.0375

Fluido: factor de variación dado por el tipo de fluido de proceso; Inclina: factor de variación dado por la inclinación del colector; F×I: interacción entre los factores tipo de fluido e inclinación; gl: grados de libertad, C.V.: coeficiente de variación, T_{120} : temperatura a los 120 min de operación; Q_{abs} : calor absorbido; T_P : temperatura de pared; h_i : coeficiente de convección térmica. El símbolo * indica que al menos un nivel dentro del factor de variación produjo un efecto diferente en relación con el resto ($\alpha = 0.05$). El símbolo * indica que hubo significancia en el efecto ($\alpha = 0.05$) causado entre niveles dentro del factor de variación.

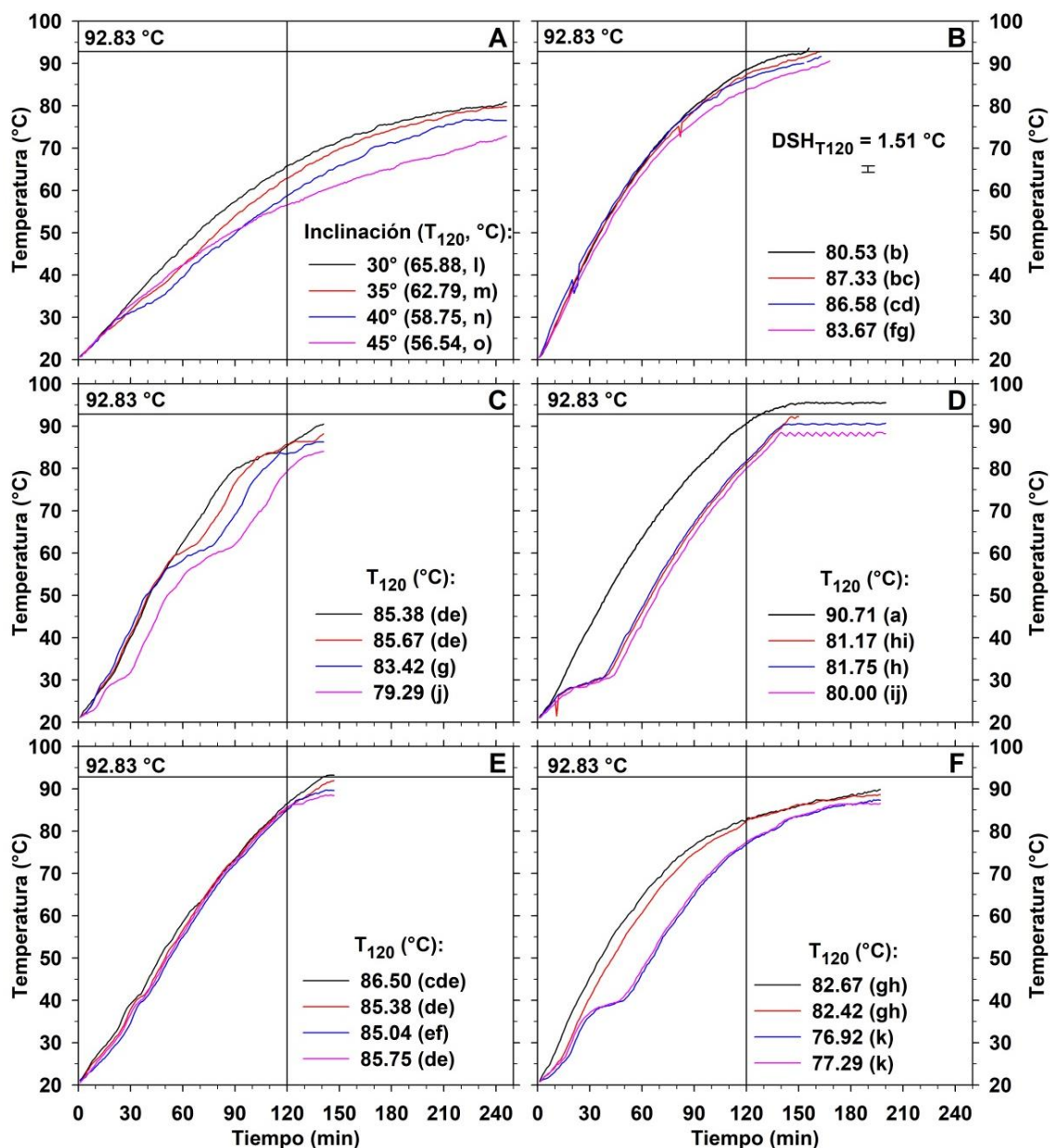


Figura 4.6. Variación de la temperatura en función del tiempo del fluido de proceso formado por agua pura (A) incorporada con rebabas de cobre (B), carbón activado (C), tinta china (D), nanopartículas de plata (E) y nanopartículas de cobre (F). T_{120} es temperatura alcanzada a después de 120 min de calentamiento. DSH: diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). La constante 92.83 °C corresponde a la temperatura de ebullición del agua a 77.993 kPa. Letras diferentes asociadas a T_{120} indican diferencia significativa en este parámetro.

Cuadro 4.3. Comparación de medias de la operación de un colector parabólico compuesto afectada por el tipo de fluido de proceso y el ángulo de inclinación del sistema.

FV	T ₁₂₀	Q _{abs} (W)	T _P (°C)	h _i (W/m ² °C)
<u>Tipo de fluido</u>				
Ap	60.9896 e (1.0902)	41.6183 e (1.1055)	77.5345 d (1.5558)	12.5197 c (0.4868)
Rc	86.5278 a (0.5427)	59.4491 d (0.5480)	93.0108 c (0.7758)	17.4789 a (0.2499)
Ca	83.4375 c (0.7743)	64.1055 b (0.7858)	92.2767 c (0.9159)	15.7617 b (0.5378)
Tc	83.4063 c (1.2970)	64.1564 b (1.2890)	107.8120 a (1.5805)	10.6126 d (0.9308)
Np	85.6667 b (0.2145)	66.5945 a (0.2308)	103.2413 b (0.5734)	12.2644 c (0.2400)
Nc	79.8542 d (0.8202)	60.8583 c (0.8337)	92.3272 c (0.9735)	15.1566 b (1.1776)
DSH	0.5831	0.5926	1.8141	0.8524
<u>Inclinación del colector</u>				
30°	83.2755 a (1.9845)	62.7056 a (1.9951)	93.6484 b (1.8078)	15.9920 a (0.6262)
35°	80.7917 b (2.0181)	60.2578 b (2.0614)	95.9692 a (2.5092)	13.8882 b (0.8286)
40°	78.7431 c (2.2919)	58.1883 c (2.3244)	95.2686 a (2.4362)	12.9517 c (0.8257)
45°	77.1111 d (2.3325)	56.7030 d (2.3831)	92.5821 b (3.0120)	13.0307 c (0.6627)
DSH	0.4269	0.4363	1.3283	0.6241

FV: factor de variación; T₁₂₀: temperatura a los 120 min de operación; Q_{abs}: calor absorbido; T_P: temperatura de pared; h_i: coeficiente de convección térmica; AP: agua pura; RC: agua con rebabas de cobre; CA: agua con carbón activado; TC: agua con tinta china; NP: agua con nanopartículas de plata; NC: agua con nanopartículas de cobre; DSH: diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, 0.05). Los valores entre paréntesis representan errores estándar.

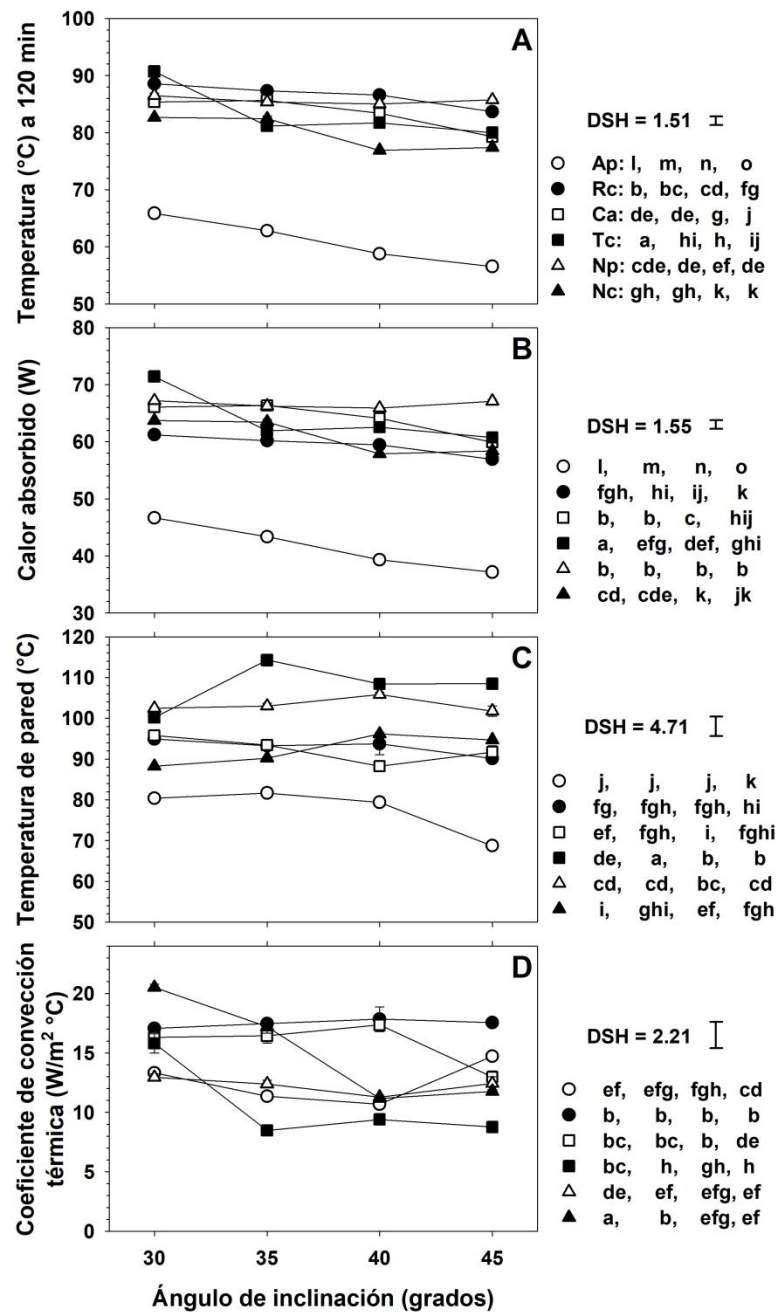


Figura 4.7. Variación de la temperatura alcanzada (A) a 120 min de operación (T_{120}), del calor absorbido hasta esa condición (B), la temperatura de pared (C) y el coeficiente de convección térmica (D), afectados por el ángulo de inclinación del equipo. Ap, Rc, Ca, Tc, Np y Nc representan a agua pura y fluido de proceso con rebabas de cobre, carbón activado, tinta china, nanopartículas de plata y nanopartículas de cobre, respectivamente. Las letras asociadas a cada símbolo corresponden a los ángulos de 30, 35, 40 y 45°, respectivamente. Letras diferentes indican diferencia significativa. DSH es diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05).

La temperatura alcanzada a los 120 min (T_{120}) se afectó tanto por el tipo de fluido de proceso, como por la inclinación del colector, e incluso hubo interacción significativa entre ambos factores de variación (Cuadro 4.1). Todos los sistemas que usaron suspensiones de partículas presentaron temperaturas a los 120 min de operación que se ubicaron entre 79 y 87 °C en promedio, que fueron significativamente mayores ($p \leq 0.05$) a la que se registró cuando se usó agua pura (61 °C). El análisis de efectos mayores mostró que el uso de rebabas de cobre en mezcla con el fluido de proceso causó la mayor temperatura a los 120 min de operación, seguido por el manejo que usó nanopartículas de plata, luego el que usó carbón activado y tinta china, luego el que usó nanopartículas de cobre y finalmente por el sistema basado en agua pura (Figura 4.3, Cuadro 4.2). El uso de nanopartículas incorporadas al fluido de proceso en sistemas de colecta de energía solar ha sido reportado antes (Fang et al., 2013; Neumann et al., 2013; Ni et al., 2015) y se ha demostrado que su presencia, incluso en bajas concentraciones, favorece la transferencia de calor hacia el fluido de proceso, Wang et al., 2018, reporta el uso de 0.05 % de la masa total del fluido de trabajo y se ha explicado que alrededor de cada partícula se genera un microambiente de mayor retención de energía que favorece la incorporación de ésta al fluido. Por otro lado, a medida que el ángulo de exposición a la fuente de energía se incrementó se observó menor temperatura alcanzada en el fluido de proceso al transcurrir 120 min de operación y transitó, en promedio, de 83.3 °C a 30° a 77.1 °C a 45° (Cuadro 4.1), esto sugirió que para favorecer la colecta de energía radiante es recomendable utilizar ángulos pequeños de exposición a la fuente energética.

Aunque el análisis de efectos mayores mostró que el mejor fluido de proceso estuvo constituido por agua incorporada con rebabas de cobre, el análisis comparativo de tratamientos individuales mostró que fue el caso que usó tinta china en el fluido el que presentó la mayor temperatura a los 120 min de operación ocurrió en el caso que usó agua incorporada con tinta china con ángulo de exposición de 30° (90.71 °C; Figura 4.4A), seguido de las condiciones a 30,

35 y 40° del caso que usó rebabas de cobre (88.53, 87.33 y 86.58 °C, respectivamente).

Si bien la incorporación de tinta china causó el mejor desempeño de elevación de la temperatura cuando el equipo operó con 30° de inclinación, la aplicación de mayor inclinación causó rápida pérdida de desempeño. El segundo mejor fluido de proceso, en lo general, fue el caso que usó nanopartículas de plata (Cuadro 4.2), aunque el comportamiento particular ubicó a los tratamientos con 30 y 35° de este fluido por debajo de los mencionados para tinta china y rebabas de cobre. Sin embargo, el uso de nanopartículas de plata mostró la interesante característica de no presentar diferencias significativas en la temperatura alcanzada a los 120 min con los diferentes ángulos de inclinación, lo cual le otorga un potencial de uso mayor, pues no es afectado por la ubicación de la fuente de energía radiante (Figura 4.7A), que confirma lo descrito por Zhang et al. (2014) y Chen et al. (2015) obteniendo una alta temperatura y eficiencia fototérmica del nanofluido. El uso de carbón activado causó un desempeño similar al correspondiente a nanopartículas de plata con ángulos de inclinación de 30 y 35°, sin embargo, con mayor inclinación la temperatura alcanzada disminuyó significativamente. Finalmente, el peor desempeño entre los sistemas basados en suspensiones de partículas fue el que usó nanopartículas de cobre, aunque el desempeño fue significativamente mejor que el basado en agua pura (Figura 4.7A).

4.5.3 Calor absorbido

Se realizó la evaluación del calor absorbido (Q_{abs} , W) para un tiempo de operación de 120 min. En los casos de agua pura (Ap), carbón activado (Ca), tinta china (Tc), nanopartículas de plata (Np) y nanopartículas de cobre (Nc) el efecto del tipo de fluido y del ángulo de inclinación del equipo fue semejante al que registró la temperatura a los 120 min (T_{120}), pues el cálculo de Q_{abs} se realizó con la Ecuación (4.2), donde la concentración de partículas fue de sólo 0.05 %, por lo cual la masa (m) que constituyó el fluido de proceso no varió. En tal sentido,

la única variable que cambió en estos casos fue la temperatura de estudio ($T_{est}=T_{120}$), lo cual causó que el comportamiento mostrado por la Figura 4.7B para los mismos fuera semejante al mostrado por la Figura 4.7A.

El caso de las rebabas de cobre (Rc) tuvo una estructura de proceso distinta, pues por la ocupación de volumen de estos materiales, la masa de fluido resultó en menor cantidad. El mayor valor de Q_{abs} ocurrió con Np, seguido de Ca y Tc, luego por Nc y después por Rc, que registraron 60.01, 54.03, 54.15, 46.23 y 42.84 % más velocidad de transferencia de calor al fluido de proceso en relación al comportamiento con agua pura (Ap) (Cuadro 4.2), lo cual indicó que la incorporación de partículas mejoró significativamente el desempeño del colector de energía radiante. En forma similar a lo que ocurrió con la T_{120} el calor absorbido por el fluido de proceso se redujo en forma significativa ($p \leq 0.05$) a medida que el ángulo de inclinación se incrementó (Cuadro 4.2), con diferencia de 9.6 % entre la operación a 30° y la operación a 45°. Este comportamiento fue observado en todos los fluidos de proceso donde los mayores valores de Q_{abs} se registraron con 30° y los menores con 45° de inclinación, con excepción del fluido que usó nanopartículas de plata, cuyo registró de calor absorbido se mantuvo constante independientemente del ángulo de inclinación (Figura 4.4B).

4.5.4 Temperatura de pared

La temperatura alcanzada en la pared interna del tubo que contuvo el fluido de proceso se afectó por los dos factores de variación de manera significativa y por la interacción entre ambos, que resultó también significativa (Cuadro 4.1). El análisis de efectos mayores mostró que la mayor temperatura promedio de pared se registró en el sistema que usó tinta china, seguido del que usó nanopartículas de plata, luego por el que incorporó carbón activado, nanopartículas de cobre y rebabas de cobre y finalmente por el que usó agua pura. Dado que las mayores temperaturas de líquido y los mayores valores de calor absorbido se registraron con los menores ángulos de inclinación se esperaba que la mayor temperatura de pared hubiera correspondido a los menores ángulos, pero, aunque hubo

diferencia causada por los distintos ángulos de inclinación, no se identificó una tendencia clara. Sin embargo, hubo interacción significativa entre los factores de variación y el análisis de cada fluido en particular mostró que se formaron tres grupos. Uno de ellos estuvo integrado por Tc y Np que registraron los mayores valores de temperatura de pared (T_P) (Figura 4.4C). Por otro lado, el comportamiento con nanopartículas de plata fue muy estable, con valores altos y sin diferencia significativa causada por el ángulo de inclinación. El segundo grupo estuvo formado por Ca, Nc y Rc, donde se tuvo comportamiento similar en los ángulos de 30, 35, 40 y 45°. Finalmente, el tercer grupo tuvo un solo al agua pura (Ap) como integrante, cuyo valor de T_P fue muy inferior ($p \leq 0.05$) al registrado en los sistemas que incorporaron alguna partícula en suspensión y el valor se redujo incluso más con el mayor ángulo de inclinación, lo que confirmó que el uso de partículas, ya sea en la dimensión nano, micro o mili permite una mejoría del funcionamiento del colector de radiación térmica.

4.5.4 Coeficiente de convección térmica interno

El coeficiente de convección térmica asociado al intercambio de calor entre la pared interna del tubo del colector hacia el fluido (h_i) varió entre 8.4 y 20.5 W/m² °C. El coeficiente h_i representa el flujo de calor transferido por unidad de área y unidad de gradiente de temperatura (Ecuación 4.7; Holman, 1986). El valor de h_i se afectó por el tipo de fluido (Cuadro 4.1) y fue mayor en el sistema que usó rebabas de cobre (Rc), seguido del que usó nanopartículas de cobre (Nc) y carbón activado (Ca), luego por el sistema basado en agua pura (Ap) y nanopartículas de plata (Np) y finalmente por el que usó tinta china (Tc) en el fluido de proceso. Dado que en todos los casos el área de transferencia de calor fue la misma, los resultados mostraron que los sistemas basados en tinta china y nanopartículas de plata permiten menor transferencia de calor por cada grado de diferencia de temperatura entre el fluido y la pared del sistema. Sin embargo, los datos de calor absorbido mostraron que aun con esta característica, estos sistemas basados en nanofluidos de plata y tinta china, principalmente el caso

con ángulo de inclinación de 30°, representan las mejores alternativas de operación, junto con el uso de rebabas de cobre.

Por otro lado, se encontró que con menor ángulo de inclinación los valores del coeficiente h_i fueron mayores (Cuadro 4.2), pero la interacción entre el tipo de fluido y el ángulo de inclinación como factores de variación fue significativa (Cuadro 4.1). El análisis de cada fluido en particular mostró que el sistema que usó tinta china y nanopartículas de cobre mostraron reducción clara de h_i con el ángulo de inclinación, pero el resto mantuvieron el valor de este coeficiente sin cambios importantes (Figura 4.4D).

El sistema de colección de energía radiante evaluado se basó en el uso de fluido de trabajo mantenido en forma estacionaria dentro del tubo colector, por lo cual, la transferencia de calor desde la pared interna al fluido correspondió a una convección natural y en tal sentido los valores obtenidos para el coeficiente h_i son similares a los reportados en la literatura para distintas geometrías que desarrollan transferencia de calor por convección natural, donde los valores fluctúan entre 5 y 25 W/m² °C (Holman, 1986).

4.5.5 Validación de utilidad

Se realizaron mediciones físicas de la temperatura de la pared del tubo contenedor del fluido de proceso con un registrador de temperatura laser (Multímetro EXTECH EX810, USA), hasta alcanzar una condición de estabilización en el tiempo. Los datos experimentales se compararon con aquéllos estimados con la rutina de modelado a través de una representación uno a uno (Figura 4.7). Los pares de datos medidos-estimados se sometieron a una rutina de regresión lineal, de donde se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.8083, lo que indicó que la estimación hecha mediante la rutina `lsqnonlin.m` de Matlab® logró predecir los datos de la temperatura de pared del sistema en un 80.8 %. En particular, los datos correspondientes a agua pura mostraron tendencia a ser sobre-estimados, los de

nanopartículas de plata mostraron tendencia de sub-estimación y el resto no mostraron una clara tendencia de este tipo. En general, se consideró aceptable la estimación de parámetros térmicos hechos con el modelo.

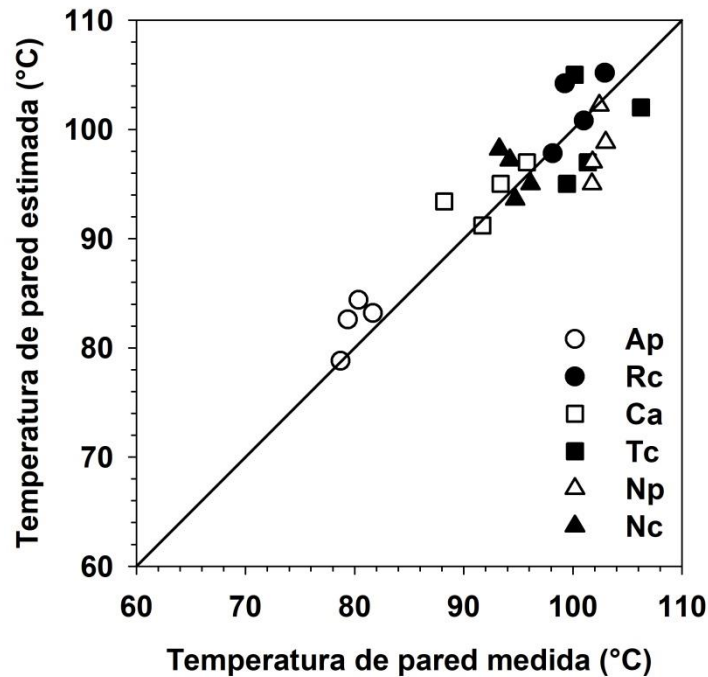


Figura 4.8. Representación 1:1 entre la temperatura de pared estimada mediante modelado con los datos experimentales evaluados en forma física.

4.5.6 Eficiencia de operación

La evaluación del sistema de colección de energía radiante utilizó tres lámparas de 500 W colocadas a una distancia de 40 cm de la parte superior de las involutas del sistema de colección de área radiante como se muestra en la figura 4.9. El área de incidencia de energía radiante fue de 1.6 m^2 , lo cual genera un flux de energía radiante disponible de 937.5 W/m^2 . En tanto, el área de las tres involutas fue de 0.3343 m^2 , lo que indicó que la incidencia de energía radiante sobre ellas fue de 313.41 W. Lee et al., (2012) encontró que incluso con una concentración baja de nanopartículas (0,05% en volumen), el nanofluido alcanzó una eficiencia hasta el 70% sin ningún grado de inclinación mientras que con base en los datos de calor absorbido reportados en la Figura 4.4 para el ángulo de inclinación de

30° en el equipo, las eficiencias de aprovechamiento del calor radiante fueron de 68.4 % para la tinta china, 64.3 % para las nanopartículas de plata, 63.2 % para el carbón activado, 61.0 % para las nanopartículas de cobre, 58.6 % para las rebabas de cobre, pero de sólo 44.6 % para el sistema que usó agua pura como fluido de proceso, lo que confirma que la incorporación de partículas en el fluido receptor incrementó significativamente la eficiencia del sistema.

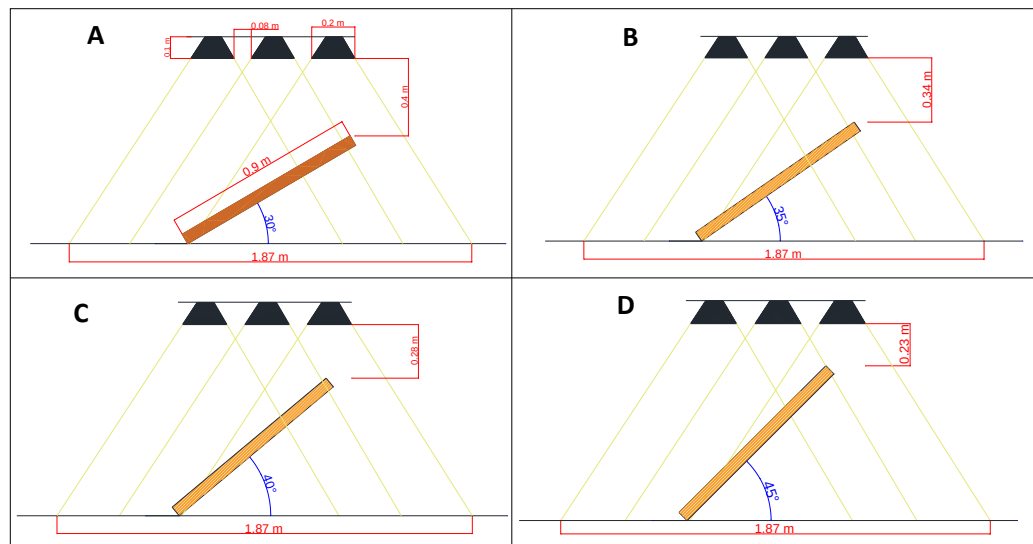


Figura 4.9. Área de iluminación en los distintos ángulos de inclinación. A: sistema con 30 ° de inclinación, B: sistema con 35 ° de inclinación, C: sistema con 40° de inclinación, D: sistema con 45° de inclinación.

4.5.7 Generación de vapor o agua caliente

Si se acepta que la operación práctica del equipo deberá realizarse con ángulo de inclinación de 30°, la pared interna del sistema alcanzará temperatura de 80.36, 95.78, 100.16, 102.43, 88.25 y 94.92 °C en los sistemas basados en agua pura, carbón activado, tinta china, nanopartículas de plata, nanopartículas de cobre y rebabas de cobre, respectivamente (Figura 4.6C). Esto significa que en los sistemas basados en agua pura y nanopartículas de cobre no es posible que el fluido de proceso alcance la temperatura de ebullición y, por tanto, no se puede obtener vapor con estas opciones. En virtud de que la temperatura de ebullición del agua se ha determinado como 92.83 °C, una vez que se alcanza esta condición se tendrá un gradiente térmico útil de 2.95 °C en Ca, de 7.33 °C en Tc, de 9.6 °C en Np y de sólo 2.09 °C en el sistema con rebabas de cobre. El flujo de

vapor producido ($\dot{m}_v$, kg/s) en cada caso puede obtenerse mediante un balance de energía con la forma de la Ecuación (4.23), donde λ es calor latente de vaporización (2275.24 kJ/kg) y el valor de h_i será de 16.29, 15.80, 12.95 y 17.06 W/m² °C en Ca, Tc, Np y Rc, respectivamente, en la condición de operación de 30° (Figura 4.6D).

$$\dot{m}_v \lambda = h_i A (T_p - T_{\text{ebull}}) \quad (4.23)$$

De esta forma, la cantidad de vapor que es posible producir es 0.0758, 0.1831, 0.1965 y 0.0561 kg/h m² con los sistemas basados en Ca, Tc, Np y Rc, respectivamente. Estos datos confirmaron que los mejores sistemas de colección de energía radiante para la producción de vapor son los basados en tinta china y nanopartículas de plata. Sin embargo, para sostener una producción de al menos 1 kg/h de vapor se deberían instalar sistemas colectores con área mínima de 5.46 m² en el tubo contenedor del fluido de proceso en el sistema basado en tinta china y de 5.09 m² en el sistema basado en nanopartículas de plata. La producción de agua caliente es otro uso viable del sistema de colección de energía radiante, pero el flujo útil dependerá de la temperatura requerida en el fluido.

4.6 Conclusiones

La incorporación de partículas y nanopartículas al fluido mejoró significativamente el desempeño del colector de energía radiante en comparación con el sistema en el cual se utilizó agua pura como fluido, siendo que este último alcanzó una temperatura de 61 °C en promedio, muy por debajo de los tratamientos con nanopartículas de plata, tinta china, carbón activado, nanopartículas de cobre y rebabas de cobre que alcanzaron una temperatura cercana a la ebullición.

Los coeficientes convectivos que se obtuvieron con las nanopartículas de plata y tinta china, muestran evidencias de ser los mejores al mantener sus valores sin variación independientemente del grado de inclinación, mientras que las nanopartículas de cobre, carbón activado y rebabas de cobre disminuyen su valor al aumentar el grado de inclinación.

La incorporación de nanopartículas a la concentración de 0.05% de la masa total del fluido arrojó mejores resultados de calor absorbido, coeficientes convectivos, temperatura del fluido y generación de vapor en comparación con el agua pura. Por lo tanto, se puede inferir que si se utiliza una concentración mayor de nanopartículas los resultados pudieran ser mejores.

De manera general independientemente del tipo de fluido utilizado el ángulo de inclinación de 30° del sistema colector de energía mostro los mejores resultados por lo que se confirma lo descrito en la literatura que a menor inclinación la eficiencia de un colector es mayor.

4.7 Literatura citada

- Chen X., Munjiza A., Zhang K., Wen D. (2014). Molecular dynamics simulation of heat transfer from a gold nanoparticle to a water pool. *J. Phys. Chem. C*. 118: 1285–1293.
- Debernardi-De La Vequia H., Ortiz-Laurel H., Rosas-Calleja, D. (2016). Energía disponible a partir de biomasa de residuos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agroproductividad* 9: 68-73.
- Elimelech M., Phillip W. A. (2011). The future of sea water desalination: energy, technology, and the environment. *Science* 333: 712–717.
- Fang Z., Zhen Y. R., Neumann O., Polman A., García de Abajo F. J., Nordlander P., Halas N. J. (2013). Evolution of light-induced vapor generation at a liquid-immersed metallic nanoparticle. *Nano Lett.* 13: 1736–1742.
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2004). *Elementary Principles of Chemical Processes*, Third Edition. USA: John Wiley & Sons, Inc. 702 p. ISBN: 047168757X, 9780471687573

- Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R., Echazú R. (2007). Concentrador lineal fresnel para la generación directa de vapor de agua. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11: 03.83-03.89.
- Gea M., Tilca F., Placco C., Caso R., Machaca A., Saravia L. (2009). Acumulación térmica en hormigón de la energía solar captada por un concentrador tipo fresnel lineal para generación de vapor. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13: 03.113-03.119.
- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*, 4th Edition. NJ: Prentice Hall. 1056 p.
- Holman, J. P. (1986). *Heat Transfer*. McGraw-Hill Book Company Incorporation. New York. 602 p.
- Lee, B. J., Park, K., Walsh, T., & Xu, L. (2012). Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption. *Journal of Solar Energy Engineering*, 134, 021009-021009-6. Doi:10.1115/1.4005756.
- Lewis N. S. (2007). Toward cost-effective solar energy use. *Science* 315: 798-801
- Neumann O., Urban A. S., Day J., Lal S., Nordlander P., Halas N.J. (2013). Solar vapor generation enabled by nanoparticles, *ACS Nano* 7: 42–49.
- Ni G., Miljkovic N., Ghasemi H., Huang X., Boriskina S. V., Te C. (2015). Volumetric solar heating of nano fluids for direct vapor generation. *Nano Energy* 17: 290–301.
- Panwar N.L., Kaushik S.C., Kothari S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 1513–1524.
- SAS Institute, Inc. 1999. *SAS/STAT® User's Guide*, Version 8. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 3884 p.
- SPSS Inc. (2000). *SigmaPlot® 2000 User's Guide*. Chicago: SPSS Inc. 435 p.
- Steinfeld A. (2005). Solar thermochemical production of hydrogen—a review. *Solar Energy* 78: 603-615.
- The Mathworks, Inc. 1990–2008. *Optimization Toolbox™ 4 User's Guide*. Natick, Massachusetts, USA: The Mathworks Inc. 575 p.
- Valle-Guadarrama, S., Hernández-Álvarez, R. L., & Covarrubias-Gutiérrez, I. (2007). Modeling of the heating and cooling internal rates in fruits. Case: Mexican lime. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 30, 61-68.
- Wang H., Yangb W., Cheng L., Guan C., Yan H. (2018). Chinese ink: High performance nanofluids for solar energy. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 176: 374-380.

Xu G., Song G., Zhu X., Gao W., Li H., Quan Y. (2015). Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator. *Applied Thermal Engineering* 80: 196-204.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

La adición de materiales en el interior del tubo concentrador del sistema de colección de energía mostro una eficiencia mayor en comparación con el que solo uso agua pura como fluido de trabajo, lo que demostró que aumentando el área superficial de contacto se logra una temperatura elevada en un tiempo menor, llegando incluso a superar la temperatura de ebullición en el caso de la adición de rebabas de cobre dentro del sistema. Por otra parte, la adición de nanopartículas metálicas arrojó resultados prometedores al agregar solo el 0.05 % de la masa total del fluido, siendo la tinta china y las nanopartículas de plata las que logran temperaturas cercanas a la ebullición en intervalos de tiempo que rondan entre los 120-150 min.

Los resultados de calor absorbido y coeficientes convectivos internos en el sistema mostraron mejores resultados con la incorporación de materiales en el orden de los nanómetros siendo las nanopartículas de plata en todos sus ángulos de inclinación las que mantuvieron valores muy cercanos, seguidos por la tinta china en un ángulo de inclinación de 30°.

Este trabajo se llevó a cabo en un sistema de energía radiante, en este caso con lámparas de alógeno de 500 W/m², en comparación con otros realizados con nanopartículas este se evaluó en un sistema real de concentrador de energía el cual fue un colector parabólico compuesto ya que los otros estudios se han realizado con pequeñas muestras a nivel laboratorio.

Se requiere una investigación para evaluar el sistema de colección de energía en un ambiente real, es decir ponerlo a exposición solar directa con la implicación que esto conlleva, que sería evaluar la exposición cuando hay máxima incidencia solar o bien durante todo el día y mostrar las distintas eficiencias a lo largo del día. Otra investigación importante sería la incorporación de mayor porcentaje de nanopartículas y evaluar otras nanopartículas orgánicas.

Un trabajo importante de investigación podría ser la evaluación del sistema para otros procesos tales como la pasteurización de sustratos en producción de hongos comestibles, la utilización del fluido de trabajo como sistema de calefacción en invernaderos agrícolas o bien para el uso doméstico.

ANEXOS

Anexo 1. Código Arduino datalogger

```
#include "max6675.h"
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

int thermoDO1 = 2;
int thermoCS1 = 3;
int thermoCLK1 = 4;

int thermoDO2 = 5;
int thermoCS2 = 6;
int thermoCLK2 = 7;

const int chipSelect = 10;

MAX6675 thermocouple1(thermoCLK1, thermoCS1, thermoDO1);
MAX6675 thermocouple2(thermoCLK2, thermoCS2, thermoDO2);

/*****RELOJ*****/
RTC_DS1307 rtc;
char daysOfTheWeek[7][12] = {"Sunday", "Monday", "Tuesday", "Wednesday",
"Thursday", "Friday", "Saturday"};
```

```

/*****/
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("MAX6675 test eder ");

  if (! rtc.begin()) {
    Serial.println("Couldn't find RTC");
    while (1);
  }

  if (! rtc.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");

    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  //SDCAR

  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(chipSelect)){
    Serial.println("Card failed, or not present");
    delay(1000);
    // don't do anything more:
    return;
  }
  Serial.println("card initialized.");//copiado

```

```

delay (1000);

}

void loop() {
    DateTime now = rtc.now();

    Serial.print(now.year(), DEC);
    Serial.print('/');
    Serial.print(now.month(), DEC);
    Serial.print('/');
    Serial.print(now.day(), DEC);
    Serial.print(" (");
    Serial.print(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);
    Serial.print(") ");
    Serial.print(now.hour(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.minute(), DEC);
    Serial.print(':');
    Serial.print(now.second(), DEC);
    Serial.print(" ");
    delay(1000);

    /*****TEMOPAR*****/
    // basic readout test, just print the current temp
    Serial.print("C1 = ");
    Serial.print(thermocouple1.readCelsius( ) );
    Serial.print(" ");
    Serial.print ("C2 = ");
    Serial.println(thermocouple2.readCelsius());
}

```

```

Serial.print(" ");
delay(59000);

File dataFile = SD.open("index.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) { // Si ha podido abrir el fichero
dataFile.print(now.year(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.month(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.day(), DEC);
dataFile.print(" (");
dataFile.print(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]);
dataFile.print(") ");
dataFile.print(now.hour(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.minute(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.second(), DEC);
dataFile.print(" ");
dataFile.print("C1 = ");
dataFile.print(thermocouple1.readCelsius());
dataFile.print(" ");
dataFile.print(" C2 = ");
dataFile.println(thermocouple2.readCelsius());
dataFile.print(" ");

dataFile.close();
}

//{ while (dataFile.available()) // Mientras no llegues al final
// Serial.write(dataFile.read()); // Lee el fichero y envialo al serie
// dataFile.close(); // Cierra el fichero al acabar

```

```
    //}  
    else {    // SI no puede abrir el fichero  
        Serial.println("Error, no puedo usar indes.htm");  
    }  
    // read three sensors and append to the string:  
  
}
```