



Congreso Regional de

ENERGÍAS RENOVABLES

MEMORIAS CRER

2018



EDITOR

Dr. Iván Salgado Tránsito
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

EVALUADORES

Eólica, Eficiencia Energética y Bioenergía

Dr. Rubén Dorantes Rodríguez
Universidad Autónoma Metropolitana
Dr. Ramón Corral Higuera
Universidad Autónoma de Sinaloa
Dr. Diego Xavier del Jesús González Quijano
Universidad Autónoma de Aguascalientes

Energía Fotovoltaica

Dr. Fernando Martell Chávez
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Dr. Arturo Díaz Ponce
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
MI. Eduardo Licurgo Pedraza
Universidad Politécnica de Aguascalientes

Energía Solar Térmica

Dra. Norma Rodríguez Muñoz
Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados A.C.
Dra. Heidi I. Villafan Vidales
Instituto de Energías Renovables, UNAM
Dra. Naghelli Ortega Ávila
Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados A.C.
MI. Guadalupe Moreno Quintanar
Consortio de Energías Renovables
Dr. Manuel Peña Cruz
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Dr. Moisés Montiel González
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Dr. Eduardo Venegas Reyes
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Dr. Jorge de Jesús Chan González
Universidad Autónoma de Campeche
Dr. Sergio Lugo Ucan
Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados A.C.

Materiales y Fotoquímica

Dra. Yolanda Peña Méndez
Universidad Autónoma de Nuevo León
Dra. Ileana Medina Ramírez
Universidad Autónoma de Aguascalientes
Dra. Sara Messina Fernández
Universidad Autónoma de Nayarit
Dra. Harumi Moreno García
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Dr. Raúl Suarez Parra
Instituto de Energías Renovables, UNAM
Dr. Marciano Sánchez Tizapa
Universidad Autónoma de Guadalajara
Dr. Carlos Pineda Arellano
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Dr. Esteban Montiel Palacios
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Dr. Sergio Velázquez Martínez
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

CUERPO DIRECTIVO CIO

Dr. Rafael Espinosa Luna
Director General
Dr. Alejandro Martínez Ríos
Director de Investigación
Dr. Norberto Arzate Plata
Director de Formación Académica
Dr. Bernardino Barrientos García
Director de Tecnología e Innovación
Dr. Martín Ortíz Morales
Coordinador Unidad Aguascalientes

COMITÉS CONGRESO REGIONAL DE ENERGIAS RENOVABLES CRER-2018

Coordinación General del Congreso
MI. Guadalupe Moreno Quintanar
Dr. Arturo Díaz Ponce
Dr. Carlos Pineda Arellano

Comité de Organización

Dr. Luis Manuel Valentín Coronado
Dr. Iván Salgado Tránsito
Dr. Manuel Peña Cruz
Dr. Fernando Martell Chávez
Dr. Carlos Alberto Paredes Orta

Comité Técnico

MC. Guadalupe Ibarra Nava
Lic. Eleonor León Torres
Lic. Lucero Alvarado Ramírez
C. Martha Estela Campos Caldera



...climatización. Las cantidades de energía y demandar del uso de sistemas de salud y comportamiento, problemas económicos, debido a la compra, energía. Esto está propiciando un mayor consumo de energía en nuestro país, los sistemas de refrigeración como de gas, L4 o natural para cubrir los requerimientos de calefacción. En este trabajo se muestran resultados de los consumos energéticos anuales esperados de 8 modelos de vivienda localizada en la dinámica a lo largo de un año típico. Estos resultados se compararon con sistemas de calefacción vigentes en otros países, con el objetivo de posicionar el desempeño energético de las viviendas en un contexto internacional.

INTRODUCCIÓN

Situación actual: 28 mil (1) / 112 mil (2)

Actualmente se construyen en México: 0.5 mil (2) / Para 2050: 122 mil (1)

CONAVI. Promoción de construcción de vivienda sustentable

NOM-001-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones (residenciales)

HIPOTECA VERDE. Programa para adquisición de viviendas para el ahorro de agua y energía

NAMA de la vivienda. Acciones Nacionales Administrativas de Integración

Sistema Ecológico DEVI y SAM

Fig. 1. Información de población y vivienda en México & Programas para la vivienda sustentable

METODOLOGÍA

El estudio se realizó en la ciudad de Victoria de Durango, la cual tiene una población de 650 mil habitantes (1). La ciudad tiene un moderado crecimiento de población, siendo 1.67 veces mayor a la existente hace 40 años. En la ciudad, el 20% de la energía eléctrica es consumida por el sector residencial (4). En el 2015, el INEGI registró 455 860 viviendas particulares de las cuales 97.1% cuentan con energía y electricidad (1). Durante los inventos se percibe la preocupación de la población por calentarse, utilizando principalmente combustibles como gas y leña. En la Figura 2 se presentan las fachadas de las viviendas analizadas en este estudio, mientras que en la Tabla 1, los materiales de construcción.

RESULTADOS

Se calculó la demanda energética total anual que requeriría cada vivienda si esta estuviese climatizada en un horario de 6:00 pm a 6:00 am, manteniéndose un rango de operación de los sistemas de climatización de 21-26°C. Además se realizó la comparación de consumo con sistemas de etiquetado de vivienda internacionales.

Tabla 1. Datos cuantitativos por vivienda

Vivienda	Superficie (m ²)	Horario (h)	Temperatura (°C)
1	100	12	21-26
2	100	12	21-26
3	100	12	21-26
4	100	12	21-26
5	100	12	21-26
6	100	12	21-26
7	100	12	21-26
8	100	12	21-26

Tabla 2. Materiales de construcción

Material	Descripción
1	...
2	...
3	...
4	...
5	...
6	...
7	...
8	...

Tabla 3. Clasificación otorgada bajo esquemas de evaluación internacionales

País	Clasificación	Consumo (kWh/m ² año)
1
2
3
4
5
6
7
8

Tabla 4. Demanda energética total anual

Vivienda	Consumo (kWh/m ² año)
1	...
2	...
3	...
4	...
5	...
6	...
7	...
8	...

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El sector residencial presenta consumos energéticos elevados y presenta un gran potencial de mejora. En México, existe normatividad para lograr disminuciones en el consumo de energía en vivienda por el uso de sistemas de aislamiento en el consumo de energía del aire acondicionado tales como que la norma EN 15250, la normatividad vigente del país a través de la vivienda. De esta manera, la normatividad tiene también pérdidas de calor a través de la vivienda. Además se realizó la comparación de consumo con sistemas de etiquetado de vivienda internacionales.

Cuando se llevó a cabo la comparación de los consumos energéticos de las viviendas analizadas con los sistemas de clasificación de otros países, las viviendas analizadas obtuvieron calificaciones bajas o medias. Sin embargo, las viviendas obtenieron calificaciones bajas en países como Australia o España. Los valores obtenidos en una calificación baja en países como Australia o España, demuestran que las viviendas analizadas tienen un gran potencial de mejora para incrementar su eficiencia energética.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INEGI. Estadísticas de la Población y Vivienda de México. 2015. México: INEGI; 2015.

2. CONAVI. Programa de construcción de vivienda sustentable. 2015. México: CONAVI; 2015.

3. NOM-001-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones (residenciales). 2011. México: NOM-001-ENER-2011; 2011.

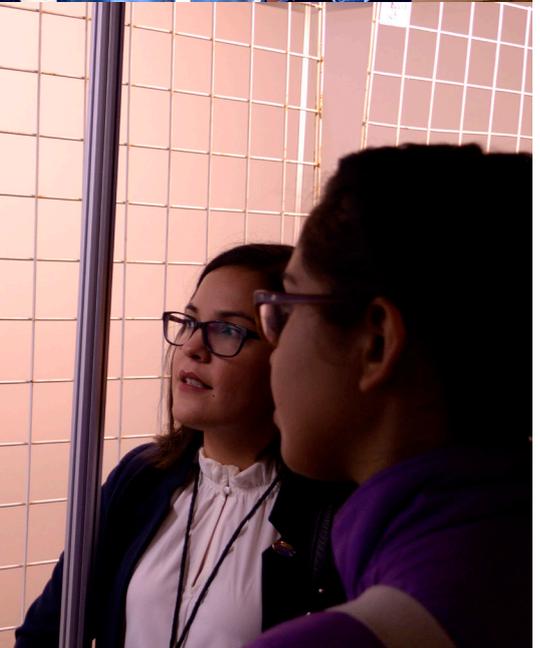
4. INEGI. Estadísticas de la Población y Vivienda de México. 2015. México: INEGI; 2015.

5. EN 15250. Normativa de aislamiento térmico en edificios. 2007. España: EN 15250; 2007.

6. AS/NZS 5300. Energy rating of residential buildings. 2011. Australia: AS/NZS 5300; 2011.

7. EN 15250. Normativa de aislamiento térmico en edificios. 2007. España: EN 15250; 2007.

8. EN 15250. Normativa de aislamiento térmico en edificios. 2007. España: EN 15250; 2007.



EDITORIAL

Algunos de los principales desafíos de nuestro mundo son el cambio climático y las estrategias a seguir para mitigar sus afectaciones. Por ello, es fundamental reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante estrategias de ahorro y uso eficiente de la energía, así como de la utilización de fuentes renovables en la generación de energía. En estas memorias se reportan estrategias para reducir el consumo energético tanto de viviendas de interés social, como en invernaderos agroindustriales mediante la incorporación de sistemas de calefacción solar. En cuanto a la generación de energía mediante fuentes renovables se presentará un estudio de ciclo de vida del proceso de desulfuración del biogás, una estrategia para reducir las concentraciones de sulfuro de hidrogeno en el biogás y así reducir los costos de operación y generación de energía; también se explora la generación de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas, con el beneficio añadido de a la par tratar suelos contaminados con residuos de petróleo; se aborda la optimización de un arreglo de 4 aerogeneradores tomando en consideración la velocidad y dirección del viento disponible en el lugar. La energía solar fotovoltaica es la tecnología renovable más importante y de mayor crecimiento en los últimos años. La investigación en celdas solares es una de las áreas más prolíficas, sin embargo, el mayor énfasis se centra en el desarrollo de celdas cada vez más eficientes, dejando de lado a otros componentes clave de un sistema fotovoltaico, como los inversores. En estas memorias se presenta la evaluación experimental de un nuevo diseño de inversor del tipo cuasi fuente de impedancia (QZSI). Exploraremos los diferentes beneficios de la energía solar térmica ya sea desde su uso para cocción de alimentos en una estufa solar, el secado solar de hojas de naranja agria, la mejora en sistemas de aire acondicionado solar o el incremento de la conversión energética de un panel fotovoltaico al ser interconectado a un colector solar para juntos formar un dispositivo híbrido termo-fotovoltaico. Se presentarán los resultados de 3 diferentes bancos de pruebas térmicos para la evaluación de intercambiadores de calor, sistemas de calentamiento híbrido aire/agua, y recubrimientos de alta temperatura. Finalmente, en cuanto a investigación en materiales se expone la síntesis de catalizadores de TiO_2 para tratamiento de aguas, fibras de carbono y oro para la detección de contaminantes en el agua y el desarrollo de películas delgadas de CdS dopado con Zn para aplicaciones en celdas solares.



ÍNDICE

4. Editorial
8. Desempeño energético de vivienda de interés social y su comparación con esquemas de calificación internacionales.
20. Análisis de Ciclo de Vida del proceso de absorción para la desulfuración de biogás.
33. Aumento de la potencia de una CCM mediante el uso de un cátodo MnO_2 soportado sobre carbón; sedimentos contaminados con petróleo como MO.
43. Análisis de un arreglo de cuatro aerogeneradores de 2MW en Cieneguillas, Zacatecas.
59. Evaluación comparativa experimental de un convertidor de potencia del tipo cuasi fuente de impedancia (QZSI) para la captación de energía solar fotovoltaica.
74. Acoplamiento de dispositivos termoeléctricos a un prototipo de desorbedor/condensador de membrana semipermeable hidrófoba.
82. Detección de derivados del fenol mediante ultramicroelectrodos de fibra de carbono y oro.
94. Procesamiento y caracterización de películas delgadas de CdS dopadas in situ con Zinc para aplicación en celdas solares.

105. Síntesis y caracterización de TiO_2 dopado con tierras raras propuesta de catalizador fotosensible.
116. Medición del perfil de temperaturas de una estufa solar tipo caja empleada para extracción de aceites esenciales.
123. Construcción de un banco de pruebas de intercambiadores de calor compactos de uso automotriz para su adaptación en calor solar de procesos industriales.
138. Secador Solar en un clima cálido-húmedo empleando Deshumidificación del Aire Ambiental.
157. Evaluación experimental de un colector solar híbrido térmico-fotovoltaico.
171. Desarrollo de un banco de pruebas para recubrimientos de absorción solar utilizando luz artificial concentrada.
180. Diseño y Simulación de un Sistema de Calentamiento Agua/Aire Multipropósito (SCAAM).
191. Diseño de invernaderos asistidos con energía solar térmica para regiones climáticas del Estado de Durango.

DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL

Y SU COMPARACIÓN CON ESQUEMAS DE CALIFICACIÓN INTERNACIONALES

**Claudia K. Romero-Pérez¹, Norma A. Rodríguez-Muñoz^{2*}, María G. Alpuche-Cruz³,
Ana C. Borbón-Almada⁴, Ignacio R. Martín-Domínguez¹**

1- Departamento de Ingeniería Sustentable. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, 34147, Durango, Dgo., México.

2- Cátedras CONACYT. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Calle CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, 34147, Durango, Dgo., México. norma.rodriguez@cimav.edu.mx

3 – Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas & Rosales S N. Hermosillo Sonora. 83000, México.

4- Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas & Rosales S N. Hermosillo Sonora. 83000, México.

Resumen: La vivienda de interés social en México, la cual está localizada tanto en climas extremos como templados, es considerada como térmicamente vulnerable por requerir grandes cantidades de energía, y por demandar del uso de sistemas de climatización. Los ocupantes de las viviendas experimentan una gran cantidad de horas fuera de confort térmico, lo cual puede provocar además de problemas de salud y comportamiento, problemas económicos debido a la compra, mantenimiento y costos de operación dichos sistemas de climatización. Este panorama es común debido a que la vivienda de interés social es planeada como vivienda de bajo costo, sacrificándose elementos importantes como el diseño adecuado y comportamiento térmico de los materiales utilizados para su construcción. El aumento en población y la necesidad de cubrir la demanda de vivienda en nuestro país, anuncia una mayor demanda de vivienda y por lo tanto un creciente consumo de energía. Esto está propiciando estrés sobre el suministro de energía eléctrica para los sistemas de refrigeración como de gas LP o natural para cubrir los requerimientos de calefacción. En este trabajo se muestran resultados de los consumos energéticos anuales esperados de 8 modelos de vivienda localizada en clima semiárido frío. Los resultados fueron obtenidos mediante simulación dinámica a lo largo de un año típico. Estos resultados se compararon con sistemas de calificación vigentes en otros países, con el objetivo de posicionar el desempeño energético de las viviendas en un contexto internacional.

Palabras clave: vivienda, desempeño energético, eficiencia energética, TRNSYS.

1. Introducción

El constante desarrollo de la humanidad ha sido posible gracias al uso de energía, impulsándose el crecimiento socioeconómico de las naciones. La disminución de las reservas de combustibles fósiles, la preocupación ambiental por el calentamiento global y la necesidad de reducir el gasto generado por el consumo energético, han motivado a que constructores, académicos, comunidad científica y la sociedad en general busquen disminuir el consumo energético, con el fin de mitigar la generación de las emisiones de CO₂ a nivel mundial. Ante esta situación la eficiencia energética en edificaciones, toma especial importancia. En el documento de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [1] se reporta que a nivel mundial el 20% de la energía es utilizada en edificaciones residenciales. De acuerdo al reciente reporte, “The Future of Cooling”, de la IEA [2], en 2017 el enfriamiento y calentamiento de espacios representa aproximadamente el 20% y 6% del uso de electricidad en edificaciones, respectivamente. Mientras que las proyecciones al 2050 indican que la adopción de sistemas de climatización incrementará este porcentaje en más del 30% para sistemas de enfriamiento y hasta un 7.5% para calefacción.

1.1. La vivienda y su consumo energético

Según la Comisión Nacional de la Vivienda (CONAVI), la vivienda y su medio ambiente se definen de la siguiente manera: “La vivienda y su entorno urbano son elementos básicos que sustentan la vida diaria en México y cada día se comprueba cómo un diseño adecuado, una ubicación apropiada, una correcta planeación urbana y regional, el diseño arquitectónico, un proceso de edificación y una operación de la vivienda efectivos, van a tener repercusión no solo en la productividad económica, sino también en la salud de sus habitantes y en el medio ambiente natural” [3].

De acuerdo al censo del 2011 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México hay 28 millones de hogares con 112 millones de ocupantes. Se espera que en el 2050 habrá 122 millones de habitantes [4], debido a este crecimiento se esperan retos en tres sectores clave: agua, energía y vivienda. De acuerdo al balance nacional de energía del 2016, la vivienda en México es responsable del 17.5% del consumo de energía total y tuvo un aumento del 1.8% con respecto al 2015 [5]. Adicionalmente, se conoce que en las viviendas mexicanas se utilizan principalmente los siguientes combustibles: gas (33%), leña (33%), electricidad (28%) y energía solar (0.77%) [6]. El uso de energía en una vivienda, comprende principalmente la operación de sistemas de calefacción y refrigeración de los espacios, siendo hasta un 44% del total; mientras que el consumo por iluminación y electrodomésticos puede alcanzar un 33% [7]. Por lo que el uso de sistemas de acondicionamiento de aire, ya sea de calefacción o refrigeración en vivienda son los responsables también de grandes cantidades de emisiones de CO₂.

1.2. Normatividad en México

En México se aplica un esquema de evaluación denominado Sisevive-Ecocasa, a través de dos herramientas: DEEVi (Hoja de cálculo para el diseño energéticamente eficiente de la vivienda) y SAAVi (Simulador de ahorro de agua en la vivienda). Estas herramientas permiten valorar la vivienda desde el punto de vista ambiental y energético. La base de este programa de evaluación es reducir el consumo energético y el uso racional del agua.

En el 2011, se publicó una reglamentación para eficiencia energética en edificaciones habitacionales, la NOM-020 ENER-2011 [8]. Esta norma mexicana tiene el propósito de restringir las ganancias de calor a través de la envolvente de una vivienda, con el objetivo de reducir el consumo de energía debido al uso de aire acondicionado. La NOM-020-ENER-2011 ha sido discutida en numerosos estudios por académicos, profesionistas involucrados en el medio y por representantes de CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) y se ha encontrado que está limitada a medidas generalizadas para la reducción de cargas por refrigeración en climas cálidos. Aunque la NOM-020 se encuentra activa, por lo general es ignorada ya que los reglamentos municipales son los que regulan la construcción, situación por la cual promueve el desconocimiento de su aplicación.

1.3 Sistemas de calificación de vivienda internacionales

Durante las últimas décadas se han implementado diversos estándares de eficiencia energética para edificaciones residenciales, principalmente en Europa y países como Australia, Brasil, China y Sudáfrica, entre otros. Esto ha generado una importante cantidad de sistemas de calificación y etiquetado a nivel mundial. A continuación, se mencionan algunos sistemas vigentes actualmente.

En Brasil [9], bajo el sistema de etiquetado vigente, Brazilian Labelling Program (Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE), los autores muestran con su estudio la necesidad de mejorar el desempeño térmico y energético de las edificaciones residenciales de interés social ya que con las características actuales se demuestra que la mayoría de los proyectos tienen una tendencia hacia el bajo desempeño. En el análisis realizado por Bodach y Hambhaber[10], se muestra que el PBE incentiva el uso de sistemas de aire acondicionado, calentamiento de agua y sistemas de iluminación eficientes. En este trabajo se concluye que a mayor eficiencia energética en la vivienda social, más se apoyaría en el mejoramiento del ingreso del sector económico más vulnerable.

En Australia, se tiene el denominado Nationwide House Energy Rating Scheme (NatHERS), el cual califica la vivienda basada en su diseño y desempeño energético con un sistema de calificación de 10 estrellas. Este esquema ha sido objeto de estudio de numerosos autores, tales como Kordjamshidi y King[11], ellos comparan el esquema actualmente utilizado contra uno propuesto por los autores. Donde los autores mencionan que el trabajo se realizó debido a la discriminación percibida por arquitectos y diseñadores hacia la aplicación de medidas de diseño climático responsivo. Kordjamshidi y King confirman que para climas templados, las estrategias están relacionadas fuertemente con el modo de operación de la vivienda, por lo que ellos proponen un esquema que pondere los beneficios de utilizar sistemas de acondicionamiento de aire contra el denominado de “free-running performance”.

En China, existen al año 2015, un total de 17 estándares relacionados con edificación verde a nivel federal y aproximadamente 50 esquemas a nivel de provincia. En un exhaustivo análisis, se detalla el nivel de aplicación de los estándares, los cuales son subdivididos en tres categorías: base, general y especializada[12]. Dentro de la categoría especializada China, se tiene el “Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings (GB50189-2005)”, el cual se encuentra relacionado con la forma del edificio, radio de acristalado/muros, el coeficiente de transferencia de calor de la envolvente, sombreados,

entre otras características de la edificación. Una de las conclusiones más relevantes de este estudio, es el señalar que se tienen estándares para edificaciones con los cuales se cubre la mayor parte de los requerimientos del edificio, sin embargo, aún es necesario englobarlas en un estándar nacional en lugar de proceder a duplicarlas a nivel de provincia.

1.4. Vivienda de interés social

La vivienda de interés social nace por la necesidad de brindar una vivienda digna y de bajo costo a la población. Desde hace décadas ha aumentado la demanda de estas viviendas, resultando en la construcción masiva de desarrollos con baja calidad, donde en la mayoría de los casos se pasan por alto las necesidades del usuario y el impacto ambiental, teniéndose como consecuencia, el pobre desempeño térmico de la vivienda[13]. El modelo de vivienda de interés social económica tradicional, se construye de manera masiva y con características similares a nivel nacional. Los diseños constructivos utilizados y los materiales empleados, generalmente no satisface el requerimiento de confort térmico del usuario, provocándose altos consumos de energía por climatización. En México, cada año 30% de las viviendas que se construyen son de interés social [14] y estas carecen de confort térmico en su interior.

El estudio se realizó en la ciudad de Victoria de Durango, la cual tiene una población de alrededor 650 mil habitantes en 2015[15]. La ciudad tiene un moderado crecimiento de población, siendo 1.87 veces mayor a la existente hace 40 años. En la ciudad, el 20% de la energía eléctrica es consumida por el sector residencial [7], [16]. Y en 2015, el INEGI registró 455 860 viviendas particulares de las cuales 97.1% cuentan con energía y electricidad [15]. Durante los inviernos se percibe la preocupación de la población por calentarse, utilizándose principalmente combustibles como gas y leña. A partir del año 2000, se realizaron importantes modificaciones en materia de vivienda en el país, como consecuencia se tuvo un marcado crecimiento en la construcción de vivienda en los márgenes de la ciudad.

2. Metodología

En este trabajo se analizó el comportamiento energético de ocho viviendas típicas de la ciudad de Victoria de Durango, México. Mediante simulación dinámica se obtuvieron resultados horarios de la demanda energética anual que cada vivienda requeriría para mantenerse dentro del rango de confort establecido. Para este estudio, se seleccionó el rango de 21 a 26 °C, el cuál fue calculado con la ecuación de Auliciems [17]. La energía requerida por la vivienda se calculó por medio de un modelo simplificado el cual permite calcular la energía necesaria para mantener la temperatura en la edificación dentro de los rangos de temperatura seleccionados. El funcionamiento de este sistema simplificado se basa en la hipótesis de que el requerimiento energético de la calefacción y el enfriamiento sería siempre una función de la temperatura del aire de la zona térmica.

Finalmente, se compararon las demandas energéticas por unidad de área esperadas (kWh/m²) de un año, entre las viviendas locales y contra varios esquemas de evaluación y etiquetado de otros países. Este último análisis se realizó con el objetivo de contrastar el desempeño energético de las viviendas construidas en la ciudad de Victoria de Durango y viviendas evaluadas con diversos esquemas de calificación internacionales.

2.1. Simulación dinámica

La simulación dinámica es un método mediante el cual es posible analizar y cuantificar la interacción de la edificación con el entorno. A través de esta herramienta es posible considerar gran número de variables necesarias en el balance de energía de la edificación. Una característica importante de la herramienta de simulación es que nos permite realizar adaptaciones al modelo existente, de esta forma es posible llevar a cabo una nueva simulación y obtener diferentes resultados una vez aplicada la adaptación.

Para realizar el estudio de desempeño energético de la vivienda, se realizaron simulaciones numéricas, utilizando el programa TRNSYS 17. Mediante un análisis detallado del desempeño térmico de la edificación permite tener un diagnóstico del uso de energía en la edificación y así obtener información cuantitativa para proponer mejoras en el diseño que reduzcan el consumo de energía en la vivienda. La evaluación se centra en las características de la envolvente térmica, su forma, sistemas constructivos, materiales y sus propiedades físicas. Todo esto, se conjuga con el clima y locación en un análisis dinámico anual.

La información climática requerida fue obtenida a través del software generador de clima Meteonorm 7, el cual produce un archivo tipo TMY (año meteorológico típico) basado en promedios mensuales. Para este estudio se utilizó la información climática de la ciudad de Victoria de Durango, la cual se encuentra ubicada en 24° 56' 05" N 104° 54' 43" O, a una altitud promedio de 1880 msnm. En la ciudad la temperatura máxima reportada es de 35.4 °C y la mínima de -4.25 °C, con una oscilación diaria entre 13 y 17 °C. La temporada de lluvias se presenta durante el verano, produciéndose un aumento en el porcentaje de humedad relativa en el aire, la cual oscila entre 50% y 70%.

2.2. Modelo físico de la vivienda

En la Figura 1 se presentan las fachadas de las viviendas analizadas en este estudio, mientras que en la Tabla 1, se muestra el área construida de los 8 modelos de vivienda. Las áreas de estas viviendas van desde 44.16 m² a 70.67 m², y son denominadas como vivienda popular y tradicional según la clasificación de vivienda social en México.



Figura 1. Fachadas correspondientes a la vivienda analizada.

Tabla 1. Área construida de las viviendas analizadas.

Número de vivienda	Área de vivienda (m ²)
1	44.97
2	44.16
3	50.31
4	70.67
6	50.05
7	65.40
8	62.95

Las propiedades físicas (conductividad térmica, calor específico y densidad) de los materiales de la vivienda se encuentran en la Tabla 2. La información de las viviendas analizadas fue proporcionada por desarrolladores locales interesados en mejorar el desempeño de las viviendas que construyen y comercializan.

Las viviendas están compuestas de materiales típicos de construcción local. El diseño arquitectónico de la vivienda utiliza adosamiento de muros laterales de viviendas vecinas, la fachada principal está expuesta al exterior y el muro del patio exterior colinda con el patio de la vivienda trasera. Las viviendas son analizadas bajo los mismos parámetros: orientación, materiales, clima, horarios de ocupación, número de ocupantes, infiltraciones y ganancias internas.

Se empleó el programa Google SketchUP con TRNSYS 3D plug-in para la definición geométrica de las viviendas y sus diferentes zonas térmicas. De las viviendas analizadas, 5 modelos son diseños de constructores locales y 3 son proyectos del Instituto Municipal de la Vivienda (INMUVI). Las viviendas se componen de espacios básicos como: sala, comedor, cocina y 2 recámaras. También cuentan con un pequeño patio trasero y una cochera con espacio para un vehículo. Todas las viviendas se consideraron con orientación sur. La privacidad de la información de las viviendas es protegida identificando cada vivienda con un número.

Tabla 2. Propiedades físicas de los materiales que componen la vivienda[18], [19].

Tipo	Material	Conductividad térmica k (kJ/h m K)	Calor específico Cp (kJ/kg K)	Espesor L (m)	Densidad ρ (kg/m ³)
Piso	Concreto armado	6.2640	0.84	0.080	2300
Losa azotea	Lechada de mortero	3.1392	0.72	0.002	1860
	Ladrillo maceteado	2.7648	0.20	0.025	2000
	Mortero	2.5128	0.72	0.025	1860
	Tierra de azotea	0.3420	0.44	0.075	1500
	Membrana asfáltica	0.6120	1.26	0.002	1127
	Concreto armado	6.2640	0.84	0.100	2300
	Yeso	1.3392	1.09	0.020	800
	Texturizado	0.5256	1.00	0.003	1760
Muro Exterior	Pintura	0.4572	1.00	0.001	1270
	Enjarre de mortero	2.9232	0.72	0.020	1860
	Tabique rojo recocido	3.1392	0.90	0.130	1920
	Yeso	1.3392	1.09	0.020	800
	Texturizado	0.5256	1.00	0.002	1760
Muro colindante	Texturizado	0.5256	1.00	0.002	1760
	Yeso	1.3392	1.09	0.020	800
	Tabique rojo recocido	3.1392	0.90	0.260	1920
Ventanas	Acristalamiento sencillo	3.2400	0.750	0.003	2000

2.3. Metodologías de evaluación internacionales

En varios países existen sistemas de etiquetado energético de edificios residenciales, el cual ayuda a clasificar y calificar a las viviendas de acuerdo a los requerimientos energéticos anuales. Para este trabajo se compararon los requerimientos energéticos de las viviendas contra los sistemas de evaluación de: Australia, España, Francia e Irlanda. A continuación se describen brevemente los esquemas internacionales.

a) Australia: NatHERS. Se utiliza el sistema de calificación por estrellas llamado Nationwide House Energy Rating Scheme (NatHERS), el cual califica la eficiencia energética de la vivienda basado en su diseño [20] mediante una estimación del uso de energía por climatización en la vivienda.

b) España: Calener. En España se utiliza la herramienta Calener -VYP v1.0, la cual proporciona dos indicadores: emisiones de CO₂ y consumo de energía primaria [21]. Para este trabajo se presenta una comparación contra la ciudad de Almería, la cual representan un clima similar para la comparación con Durango.

c) Francia: Diagnostic de Performance Énergétique (DPE). En Francia se realiza un diagnóstico del rendimiento energético de la vivienda, estimando su consumo de energía y sus emisiones de gases de efecto invernadero [22]. Este diagnóstico está pensado para informar al comprador y al arrendatario. Se usan 2 etiquetas, una que indique el consumo de energía anual de la vivienda en una escala de A (bajo consumo <51 kWh/m² · y) a G (alto consumo, >450 kWh/m² · y) y una etiqueta climática que indica el impacto anual de este consumo de energía en las emisiones de gases de efecto invernadero CO₂ en una escala que varía desde A (baja emisión, < 6 kilogramos de carbono equivalente/m²·y) a G (emisión significativa, > 80 kilogramos de carbono equivalente/ m²·y).

d) Irlanda: Building Energy Rating Certificate (BER). En Irlanda se utiliza un certificado de energía basado en consumo de energía de la edificación [23]. El certificado califica dos indicadores; energía y CO₂ y proyecciones de consumo de energía. Calculan el consumo de energía realizado durante un año. Toma en cuenta diferentes combustibles, calefacción y enfriamiento distrital y electricidad. Las casas son calificadas desde A1 a G (A1 es lo más eficiente) basándose en la eficiencia de la climatización, el calentamiento de agua, la ventilación, el aislamiento y el arreglo de la iluminación en la edificación.

3. Resultados

En este trabajo, se estudió el comportamiento energético de ocho modelos de viviendas. En este análisis se simularon las viviendas con la geometría y materiales originales bajo las cuales fueron diseñadas y construidas. A continuación, se analizan los resultados de consumos energéticos totales anuales requeridos para climatizar (refrigeración y calefacción) y su comparación con otros sistemas de etiquetado de vivienda internacionales.

3.1. Demanda energética calculada

Se calculó la demanda energética total anual que requeriría cada vivienda si esta estuviese climatizada en un horario de 6:00 pm a 8:00 am, manteniéndose un rango de operación de los sistemas de climatización de 21-26°C [17].

En la Figura 2, se muestran los requerimientos energéticos calculados para cada vivienda, donde se puede observar que la vivienda que consumiría mayor cantidad de energía es la #4, un total de 14,290 kWh/año, 38% más energía que la vivienda que requeriría menor cantidad de energía (#1, 8,848 kWh/año). Sin embargo, cuando se analiza el requerimiento energético por unidad de área construida de cada una de las viviendas, la vivienda que requeriría mayor cantidad de energía por metro construido es la vivienda #4 (269.24 kWh/m²- año) y la que requerirá menor cantidad será la #8 (232.17 kWh/m²- año).

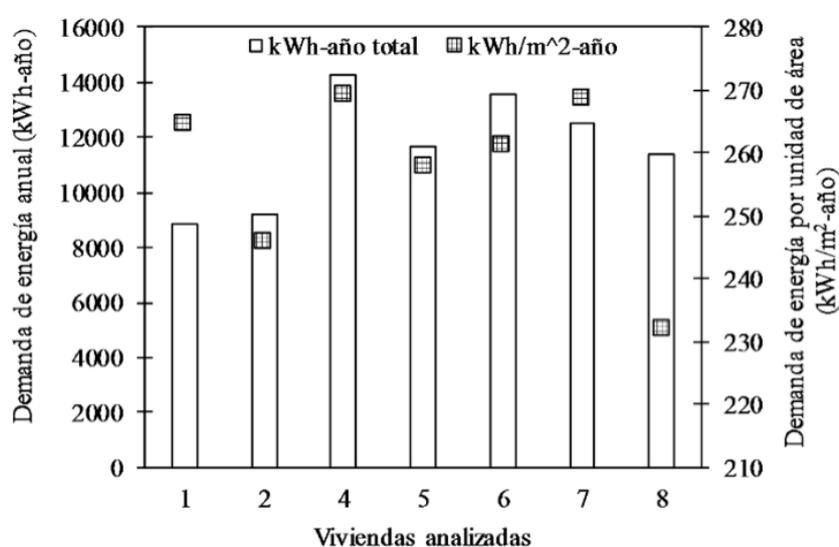


Figura 2. Demanda energética calculada total anual y por unidad de área construida.

3.2. Comparación con esquemas de evaluación internacionales

En la Tabla 3, se presenta la comparación de consumos y calificaciones obtenidas por las viviendas de la Ciudad de Durango y los diversos esquemas internacionales. En el encabezado de la tabla se menciona el país y ciudad al cual corresponde la calificación, así como el tipo de clima, de acuerdo a la clasificación Köppen al cual pertenecen. Esto con fines informativos y para apoyar a la asimilación de la información presentada.

Al comparar los requerimientos energéticos de las viviendas analizadas en esta investigación, y los requerimientos de los anteriormente mencionados programas de etiquetado y evaluación, se encuentra que las viviendas que se construyen en la ciudad al compararse con los estándares de Australia y España, se encuentran en la última clasificación que corresponde al peor desempeño esperado. Esto es con calificaciones de 1 estrella para Australia (★) y una calificación (E) dentro del sistema español.

Sin embargo, cuando se compara contra el estándar DPE francés, el cual tiene una escala A-G, la mayoría de las viviendas se encuentran con un desempeño equivalente a la calificación (E), que corresponde a un consumo anual de 231 a 330 kWh. Por lo que el comportamiento de las viviendas bajo un estándar francés sería apenas satisfactorio. Al contrastar el comportamiento de las viviendas locales contra el standard de Irlanda, también con escala A-G, se observa que las viviendas califican en las calificaciones desde la (C3 hasta la E1), colocándolas como viviendas con un desempeño igualmente apenas aceptable y con importantes posibilidades de mejora.

4. Conclusiones

El sector residencial presenta consumos energéticos elevados y presenta un gran potencial de. En México, existe normatividad para lograr disminuciones en el consumo de energía en vivienda por el uso de sistemas de enfriamiento, sin embargo, la normatividad vigente deja fuera consideraciones importantes como la consideración de que la vivienda no solo tiene ganancias de calor a través de la envolvente sino también pérdidas. Además, de acuerdo a los métodos de análisis requeridos por la normatividad vigente se promueve la ejecución de cálculos en estado estable, restando la efectividad de su aplicación.

Tabla 3. Comparación de calificación otorgada por los esquemas de evaluación de otros países

#	Vivienda México (Durango, BSk) Consumo energético anual (kWh/m ² -año)	Australia (Melbourne, Cfb) Estrellas (★) 0-10 (kWh/m ² -año)	España (Almería, BSk) Calificación A-E (kWh/m ² -año)	Francia (Cfb) Calificación A-G (kWh/m ² -año)	Irlanda (Cfb) Calificación A-G (kWh/m ² -año)
		★ 155 ★★ 107 ★★★ 76 ★★★★ 55 ★★★★★ 41 ★★★★★★ 30 ★★★★★★★ 23 ★★★★★★★★ 15 ★★★★★★★★★ 7 ★★★★★★★★★★ 0.5	A < 18.6 B 18.6 – 35.7 C 35.7- 60.0 D 60.0 – 96.4 E > 96.4	A < 50.00 B 51 - 90 C 91 - 150 D 151 - 230 E 231 - 330 F 331 - 450 G > 450	A≤25 / A2>25 / A3>50 B1>75 / B2>100 / B3>125 C1>150 / C2>175 / C3>200 D1>225 / D2>260 E1>300 / E2>340 F>380 G>450
1	265	★	E	E	D2
2	246	★	E	E	D1
3	256	★	E	E	D1
4	316	★	E	E	E1
5	220	★	E	D	C3
6	261	★	E	E	D2
7	268	★	E	E	D2
8	232	★	E	E	D1

En este trabajo se obtuvieron resultados de la demanda de climatización de un año de operación de las ocho viviendas de interés. La demanda energética calculada muestra que la vivienda #4 es la que presenta mayor demanda de energía (269.24 kWh/m²- año), mientras que la vivienda #8 es la que presenta menor demanda de energía (232.17 kWh/m²- año). Se encontró, que los valores varían poco entre sí, debido a que el tamaño y las características de las viviendas son muy similares entre ellas.

Cuando se llevó a cabo la comparación de los consumos energéticos esperados de las viviendas contra los sistemas de calificación de otros países, nos damos cuenta que la demanda energética de las viviendas analizadas es consistente si consideramos que son viviendas que carecen estrategias que le otorguen eficiencia energética en su envolvente. Los valores calculados nos ubican en calificaciones bajas o apenas aceptables en países como Irlanda y Francia; las viviendas analizadas obtienen la calificación más baja en países como Australia o España, describiendo importantes posibilidades de mejora. Los valores obtenidos en demanda energética nos colocan en bajas calificaciones, demostrando que las viviendas tienen un gran potencial de mejora para incrementar su eficiencia energética.

5. Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) mediante el apoyo del proyecto de Atención a Problemas Nacionales PDCPN-2015:1099: Establecimiento de estrategias pasivas selectivas en vivienda de interés social para ciudades con clima templado seco. Al Instituto Municipal de la Vivienda de Durango (INMUVI-Durango) por los planos e información de vivienda. Asimismo al estudiante: Rubén Darío Torres-Verduzco, con número de apoyo de asistente de proyecto CONACYT:222876.

6. Referencias

- [1] IEA, "World Energy Balances 2017: Overview." 2017.
- [2] International Energy Agency, "The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning," IEA 2018, Paris, France, 2018.
- [3] Conavi, "Código de Edificación de Vivienda," p. 499, 2010.
- [4] INEGI, "Censo de Población y Vivienda [Census of population and housing -Mexico]." Mexico City, 2010.
- [5] SENER, "Balance Nacional de Energía 2015." México City, p. 136, 2016.
- [6] SENER and CONUEE, "Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social," CONUEE/GIZ, Mexico, 2016.
- [7] SENER, "Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018," 2014.
- [8] Diario Oficial de la Federación, "Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 Envolvente de edificios para uso habitacional." Diario Oficial de la Federación, Mexico, pp. 28-76, 2011.
- [9] M. A. Triana, R. Lamberts, and P. Sassi, "Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance," *Energy Policy*, vol. 87, no. December 2014, pp. 524-541, 2015.
- [10] S. Bodach and J. Hamhaber, "Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil," *Energy Policy*, vol. 38, no. 12, pp. 7898-7910, 2010.
- [11] M. Kordjamshidi and S. King, "Overcoming problems in house energy ratings in temperate climates: A proposed new rating framework," *Energy Build.*, vol. 41, no. 1, pp. 125-132, 2009.
- [12] L. Ye, Z. Cheng, Q. Wang, H. Lin, C. Lin, and B. Liu, "Developments of Green Building Standards in China," *Renew. Energy*, vol. 73, pp. 115-122, 2015.
- [13] Fundación CIDOC y Sociedad Hipotecaria Federal, "Estado Actual de la Vivienda en México," Mexico City, 2015.

- [14] J. M. Ochoa, I. Marincic, M. G. Alpuche, I. Gonzalez, G. Barrios, L. M. Barajas, and A. Gomez, "Thermal Comfort and Energy Performance of Social Housing in Hot-Dry Climates," no. November, 2012.
- [15] INEGI, "Demografía Dinámica de México," *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, pp. 122–132, 2015.
- [16] O. de Buen R., F. Hernández P., and J. I. Navarrete B., "Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas," p. 12, 2016.
- [17] A. Auliciems and S. V. Szokolay, "Thermal comfort," *PLEA Int.*, p. 66, 2007.
- [18] *Diario Oficial de la Federación*, "NOM-020-ENER-2011: Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional. [Energy efficiency in buildings: Residential use]." Mexico, p. 49, 2011.
- [19] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa, Segunda ed.* Nevada, Reno, 2004.
- [20] M. A. Dewsbury, "The Empirical Validation of House Energy Rating (HER) Software for Lightweight Housing in Cool Temperate Climates," 2015.
- [21] M. J. Ruá and B. López-Mesa, "Certificación energética de edificios en España y sus implicaciones económicas," *Inf. la Construcción*, vol. 64, no. 527, pp. 307–318, 2012.
- [22] Service-Public, "Diagnostic immobilier : diagnostic de performance énergétique (DPE)," *Republique Francaise*, 2017. [Online]. Available: <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F16096>.
- [23] SEAI Sustainable Energy Authority of Ireland, "Display Energy Certificate." [Online]. Available: <https://www.seai.ie/energy-ratings/building-energy-rating-ber/display-energy-certificate/>.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE ABSORCIÓN

PARA LA DESULFURACIÓN DE BIOGÁS

**Giseth Damaris Higinio Santander, Héctor Alfredo López-Aguilar,
Enrique Alberto Huerta Reynoso, Jorge Alberto Gómez, Antonino Pérez Hernández.**

*Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas Región Poza Rica-Tuxpan
Antonino.perez@cimav.edu.mx*

Resumen: El biogás es una fuente de energía con un gran potencial para reemplazar a los combustibles fósiles. Sin embargo, su aprovechamiento presenta complicaciones como la presencia del sulfuro de hidrógeno (H₂S), compuesto altamente corrosivo a los equipos y tóxico al ser humano. El no considerar disminuir su concentración a <200 ppm, eleva el costo de operación, por lo que resulta de vital importancia llevar a cabo un tratamiento que permita la eliminación de este compuesto. El objetivo de este trabajo es la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) en un proceso de desulfuración del biogás a partir de absorción con monoetanolamina (MEA). El interés de aplicar la herramienta surge de la capacidad de regeneración que presenta la MEA. Lo cual posibilita su empleo durante varios ciclos en el proceso de desulfuración de biogás. Se utilizaron valores experimentales y de calorimetría adiabática de reacción para estimar la capacidad de sorción y desorción e identificar los impactos por el uso de esta tecnología. Se concluye que la capacidad de regeneración de la MEA permite considerarla como una tecnología viable en la purificación del biogás desde la perspectiva del ciclo de vida.

Palabras clave: *Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Monoetanolamina (MEA), Biogás, Desulfuración, Sulfuro de hidrógeno (H₂S).*

1. Introducción

En la actualidad el consumo mundial de energía se transforma constantemente con la implementación de nuevas tecnologías. Sin embargo, la dependencia energética a los combustibles fósiles aún persiste. La energía es una necesidad primordial para el desarrollo de la sociedad, por lo que se busca la implementación de energías limpias que cubran la demanda energética, evitando el aumento de la dependencia energética convencional y el agotamiento de los recursos. Actualmente, existen una gran variedad de

energías alternas en uso y otras más se encuentran en desarrollo. Se reportó que tan solo del año 2015 al 2016 (+0.7%) se incrementó la demanda a un poco más de 13 800 millones de toneladas de petróleo equivalente. Para 2017 el crecimiento de la producción global de combustibles fósiles aumento después de dos años de estancamiento (+1.9%). De la energía total en el mundo las energías renovables representaron un 14% [1]. La energía renovable ha sustituido gradualmente a los combustibles convencionales en cinco mercados distintos: la generación de electricidad, calentamiento de agua, calefacción, combustibles para transporte y la provisión de energía en centros rurales alejados de la red energética [2].

Según cifras reportadas por SENER, la producción de energía primaria por parte de los bioenergéticos en el país durante el año 2016, fue de 4.7% [3]. Se ha identificado que México cuenta con un gran potencial para la implementación de tecnologías de digestión anaerobia (DA) en sistemas pecuarios intensivos. Se estima que existen alrededor de 3,000 establos lecheros, 1,500 granjas porcinas, 94 rastros y 905 rastros municipales, sin considerar los corrales de engorda y granjas avícolas, además de miles de pequeñas unidades que podrían utilizar biogás para autoconsumo [4]. Aún cuando la producción de biogás a partir de DA se presenta como una opción para la disposición de residuos y la generación de energía eléctrica, presenta complicaciones. Las impurezas presentes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrogeno (H_2), amoníaco (NH_3), Oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO), humedad (H_2O), partículas de polvo, siloxanos, compuestos aromáticos y halogenados [5], disminuyen el poder calorífico y causan daños en equipo y maquinaria, específicamente el H_2S es altamente corrosivo e incluso daña la salud humana y el ambiente.

Es por eso que la integración de una etapa de purificación es de vital importancia para alcanzar mejores rendimientos en los procesos de aprovechamiento de biogás. Se han probado distintos métodos para la eliminación de éstos componentes, como lavado con agua, separación criogénica, absorción física y química, adsorción por presión, membranas, método biológico, entre otros [6]. La capacidad de regeneración que presenten los sistemas de remoción es un factor importante en la selección de la tecnología más apropiada, conocer los impactos generados permite la toma de decisiones desde una perspectiva sustentable.

El presente trabajo propone el estudio de un sistema de desulfuración de biogás mediante el uso de aminas utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). De manera complementaria, a partir de experimentación se determinó la eficiencia de la MEA para la purificación del biogás y se caracterizó su capacidad de regeneración. Si bien en la actualidad existen estudios de este tipo [8,9], se plantea la realización de ACV con características específicas del sistema de DA y la purificación por aminas que aporte datos a la comunidad científica.

2. Metodología

ACV

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es una herramienta que permite identificar las entradas y salidas del ciclo de vida de un servicio o producto. Presenta los impactos potenciales, en base en una unidad funcional, en categorías orientadas a cuantificar daños al ecosistema, la salud humana, consumo de

recursos, entre otros. El ACV trata los aspectos e impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto desde su adquisición hasta su disposición final. Está regido por la normas ISO 14040-2006 e ISO 14044-2006 [9] y en México por las normas análogas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008 [10]. El ACV se compone de cuatro fases presentadas en la Figura 1.

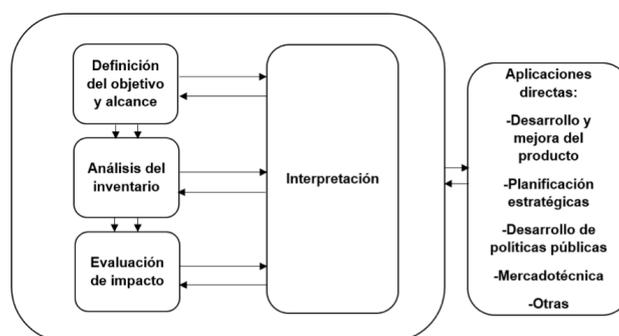


Figura 1. Etapas de un ACV.

El ACV se llevó a cabo utilizando el software SimaPro, utilizando el método ReCiPe Midpoint (H). El objetivo del estudio fue evaluar el proceso de aprovechamiento de biogás para la producción de electricidad. El alcance del estudio se presenta en la figura 2.

Definición de objetivos y alcances

El objetivo del ACV fue definir el proceso de absorción con aminas para la desulfuración e identificar los impactos potenciales que implican el uso de estas. El sistema analizado comprendió desde la entrada de biogás crudo hasta su salida como biogás con baja concentración de H_2S (desulfuración), es decir se estudiaron las interacciones Aminas-Biogás crudo (figura 2). La unidad funcional para el caso de estudio fue la remoción de H_2S en el biogás necesario para la generación de 22 kWh de energía eléctrica ($0.887 m^3$). (Figura 2). El sistema de purificación considerado en el ACV consistió en una columna empacada de policloruro de vinilo (PVC) y un empaque de anillos pall de polipropileno.

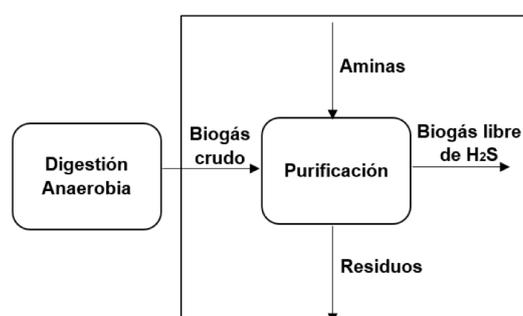


Figura 2. Etapa de purificación.

El inventario del ciclo de vida del proceso de purificación del biogás para la generación de energía eléctrica mediante de excreta bovina, se elaboró con datos obtenidos de la planta localizada en un establo productor de leche en Meoqui, Chihuahua (coordenadas: 28°14'35" N 105°28'14"W). Los límites del sistema para la elaboración del inventario se muestran en la Figura 3 Los datos correspondientes al proceso de purificación se calcularon mediante cálculos teóricos y experimentación.

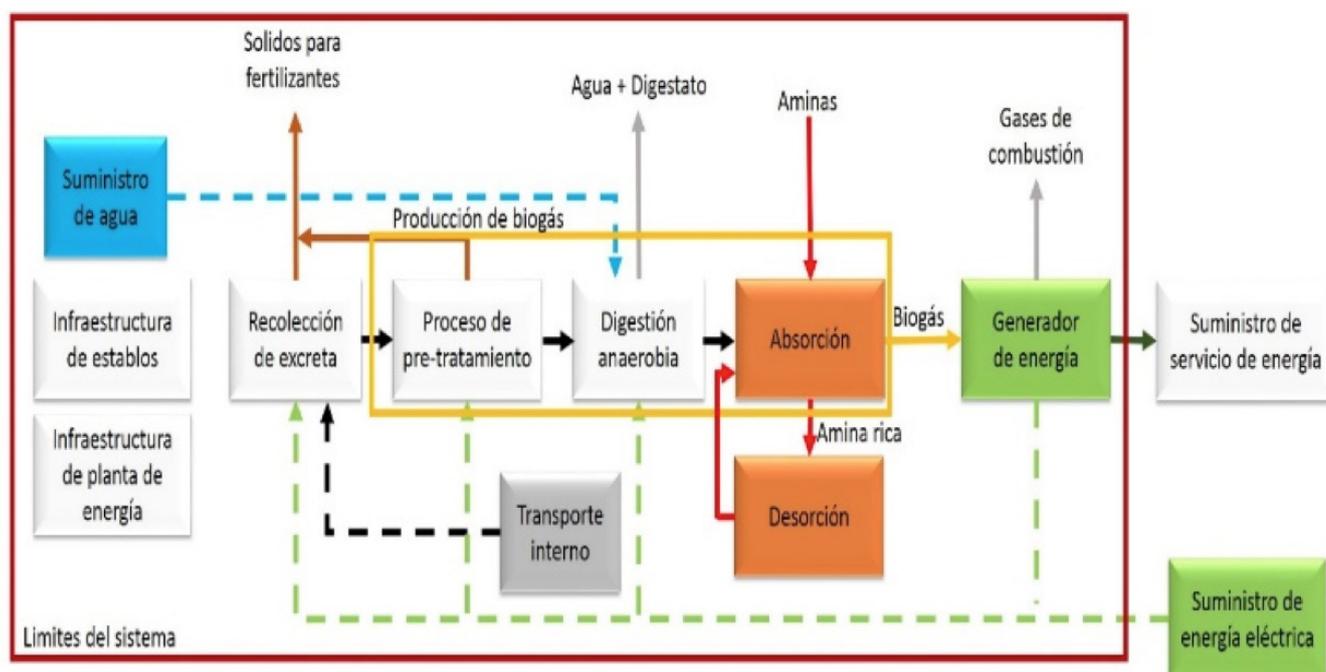


Figura 3. Límites del sistema en el ICV.

Experimentación de remoción con aminas (sorci3n-desorción)

Se realizaron pruebas experimentales con monoetanolamina (C_2H_7NO) que generaron datos utilizados en el ACV. Los experimentos para el estudio de la sorción se realizaron a escala de laboratorio con 3 repeticiones (Figura 4 y Figura 5). El biogás sintético se alimentó desde un cilindro de alta presión con una concentración de H_2S de 2000 ppm, 35% de CO_2 % y balance de CH_4 %. El flujo de 943.89 ml/min, controlado con un rotámetro Dwyer rma-03-ssv con medidor de flujo de área variable, se condujo hasta un difusor para burbujear el gas en un frasco lavador de gases con solución de amina al 20% en volumen. El biogás a la salida del sistema se analizó con el equipo COMBIMASS en intervalos de 5 min,

después de un lavado con agua (se utilizó indicador de azul de bromotimol para monitoreo el pH) se liberó la mezcla a la atmósfera. El diseño del modelo experimental se basó en el método de Lasocki, et al. [12] y Maile, et al. [13]. Así también, se utilizaron baños de agua fría para la amina, manteniéndola a una temperatura aproximadamente de 5°C.

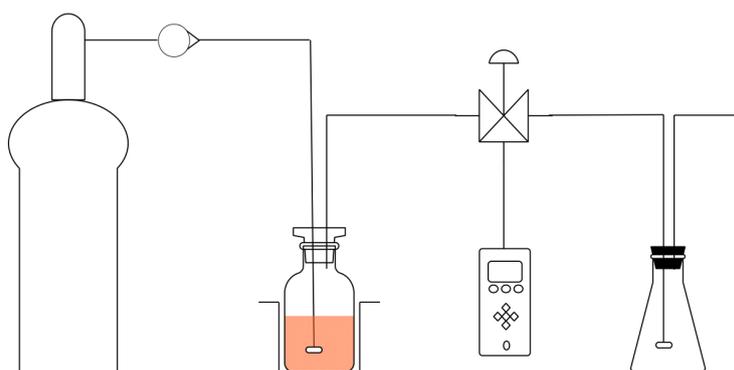


Figura 4. Diagrama de modelo experimental.



Figura 5. Secciones experimentales.

Para analizar el fenómeno de desorción se utilizó un calorímetro adiabático de búsqueda de reacción NETZSC APTAC-264, donde se introdujeron muestras de amina saturada. La Figura 6 presenta el diagrama de flujo del equipo APTAC 264. Este equipo presenta la capacidad de realizar configuraciones de múltiples entradas y salidas. Para el presente trabajo fueron utilizados el recipiente de muestreo y la cámara adiabática. Se compararon 57 gramos de una muestra de solución de amina sin ser sometida al proceso de absorción con una muestra de igual masa de amina saturada, en las pruebas de absorción, ambas muestras se sometieron a una rampa de temperatura de 2°C/min en rango de 30-100°C, en la modalidad ARC heat-wait-search. Resultados y Discusiones

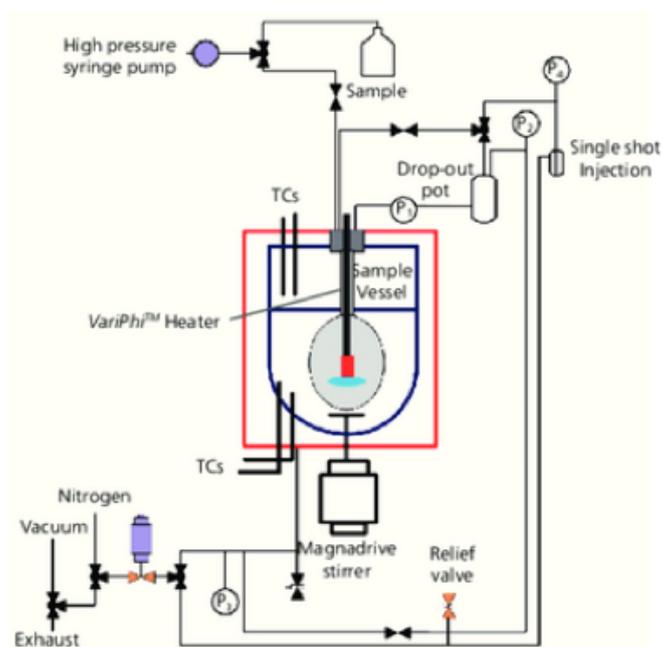


Figura 6. Diagrama APTAC.

3. Resultados y Discusiones

Experimentación de la sorción

La Tabla 1 y las Figuras 7 y 8 muestra los resultados obtenidos de la absorción de la amina en la experimentación de la sorción. En la tabla 1 se muestra el comportamiento de la MEA en un tiempo aproximado de 40 min. Se identificó una gran disminución de H₂S y CO₂ en los primeros 20 minutos de la experimentación.

Tabla 1. Resultados promedio de la experimentación de absorción por amina.

TIEMPO (min)	CH₄	O₂	H₂S	CO₂
0	60.2	0	1603.3	37.3
5	83.7	0	3.3	9.5
10	81.2	0	10.0	12.5
15	77.5	0	33.3	16.3
20	73.2	0	123.3	20.8
25	69.5	0	253.3	24.5
30	66.3	0	566.7	28.1
35	63.7	0	1073.3	30.9
40	61.9	0	1413.3	32.7

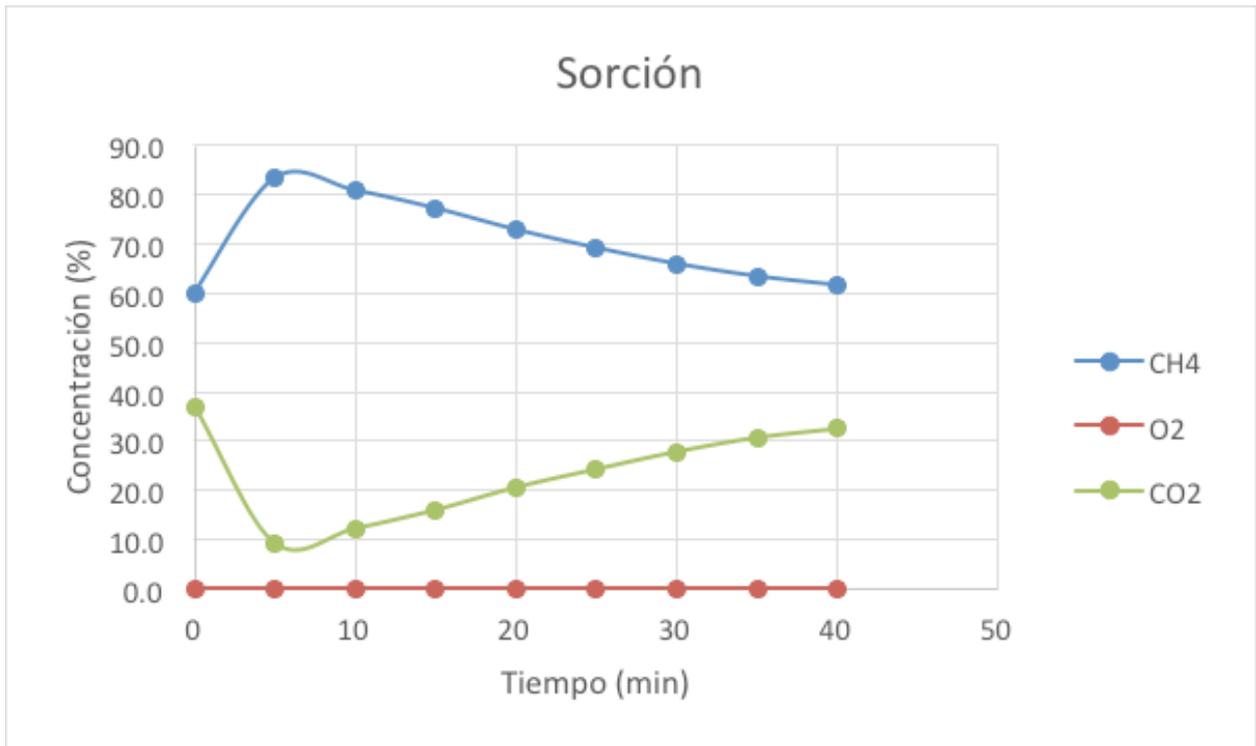


Figura 7. Resultados presentados durante la sorci3n.



Figura 8. Resultados de la sorci3n en el Sulfuro de hidr3geno.

Experimentación de la desorción

En la Figura 9, se muestran los resultados correspondientes al análisis térmico comparativo entre una amina saturada y una insaturada. En la MEA insaturada se identificó un incremento de la temperatura respecto al tiempo de manera monótonamente creciente, mientras que en la MEA saturada se encontró un escalón incremental en la temperatura (entre 50 °C a 95 °C) relacionado con el fenómeno de desorción del H₂S. La grafica resultante del análisis HWS se presenta en la Figura 10, donde al evaluar la derivada (HR) de la curva de temperatura se confirmó el rango de temperatura del fenómeno de la desorción.

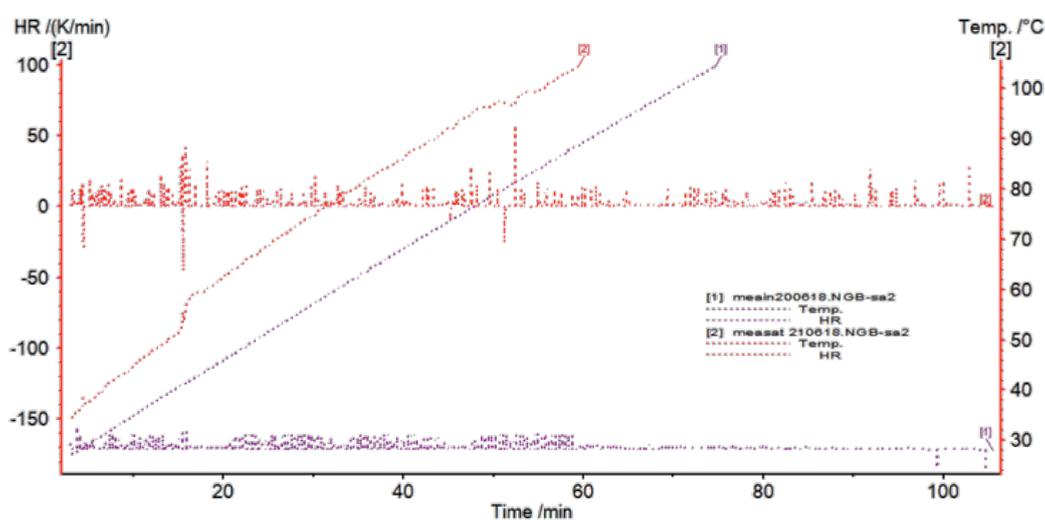


Figura 9. Comportamiento térmico y su derivada (HR) de MEA insaturada y MEA saturada en calorímetro APTAC 264 modo Heat wait search.

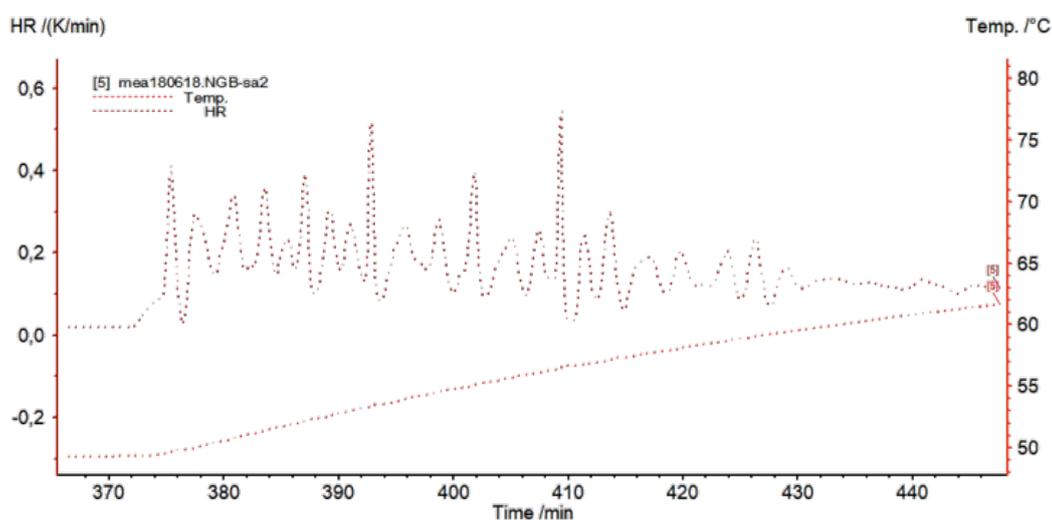


Figura 10. Comportamiento térmico y su diferencial (HR) de MEA insaturada y MEA saturada en calorímetro APTAC 264.

Ciclo de Vida

Los resultados de la evaluación de impacto del ciclo de vida se encuentran en la Tabla 2. Se calcularon valores considerables en la categoría de Cambio climático, Toxicidad humana, Ocupación de suelo agrícola, Agotamiento de metales y Agotamiento de suelo agrícola. La Tabla 2 presenta las unidades para cada una de las categorías. Desde un enfoque de punto medio los valores son representativos indirectos de un impacto, sin embargo, es difícil comparar entre categorías de impacto debido a que las unidades son diferentes. Por otra parte, éste enfoque permite el análisis con una mayor precisión que el uso de categorías orientadas al daño [14]. En el presente estudio se llevaron a cabo comparativas tanto de los procesos unitarios como de dos escenarios: a) el escenario actual de la generación de energía eléctrica mediante biogás y b) el sistema incluyendo el proceso de purificación de biogás.

Tabla 2. Resultados de la evaluación de impacto del ciclo de vida en cada categoría de impacto.

Categoría de Impacto	Unidad	Total
<i>Cambio climático</i>	kg CO ₂ eq	32.76
<i>Agotamiento de la capa de ozono</i>	kg CFC-11 eq	4.64E-07
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq	7.96E-02
<i>Ecotoxicidad del agua</i>	kg P eq	2.87E-03
<i>Toxicidad humana</i>	kg 1,4-DB eq	3.76
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	kg NMVOC	9.25E-02
<i>Formación de partículas</i>	kg PM10 eq	9.99E-02
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DB eq	1.05E-03
<i>Exotoxicidad del agua</i>	kg 1,4-DB eq	3.98E-01
<i>Radiación ionizante</i>	kBq U ²³⁵ eq	4.90E-01
<i>Ocupación de suelo agrícola</i>	m ²	1.05
<i>Ocupación de suelo urbano</i>	m ²	1.58E-01
<i>Transformación del suelo</i>	m ²	2.82E-03
<i>Agotamiento de agua</i>	m ³	1.01E-01
<i>Agotamiento de metales</i>	kg Fe eq	29.14
<i>Agotamiento de combustible fósil</i>	kg oil eq	2.03

La Figura 11 muestra la contribución de cada proceso unitario al sistema conforme a la unidad funcional. Asumiendo un tiempo de vida útil de la planta de 30 años se encontró una importante influencia de la infraestructura del establo en todas las categorías. A pesar de que la infraestructura de los establos no forma parte de la generación de energía eléctrica, las mismas son utilizadas en la recolección del sustrato. El método de recolección utilizado este diseñado acorde a la infraestructura del establo, por lo que debe ser considerado como parte del sistema.

Las Figuras 12 y 13 muestran el efecto, en algunas categorías de impacto, de la implementación del sistema de purificación por monoetanolamina. La Figura 12 presenta las categorías que presentaron una disminución al incluir este tipo de sistema. Se encontró que la mayor parte de las categorías de impacto que disminuyen presentan relación con el agotamiento de recursos (combustible fósil y transformación de suelo) y la polución (acidificación y toxicidad terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos). Tanto el agotamiento de combustibles fósiles como la transformación del suelo tienen una disminución de más del 50%, a pesar de la inclusión de la mono etanolamina al proceso, esto posiblemente debido a la mejora en el rendimiento del biogás. Las categorías de cambio climático, acidificación terrestre, ecotoxicidad terrestre y formación de oxidantes fotoquímicos tienen una disminución significativa aunque menor al 50%, asociado a la reducción de impurezas en el biogás.

Por otra parte, la Figura 13 muestra las categorías de impacto que presentaron un aumento al incluir este sistema de purificación. Se puede observar que la mayor parte de las categorías tienen una relación con el agotamiento de los recursos. Esto se relaciona principalmente a la construcción de la columna empacada del sistema de purificación. Así también, el aumento en estas categorías se asocia a procesos secundarios provenientes de la producción de la MEA. Se comprobó que la principal ventaja del uso de aminas es la capacidad de regeneración de la misma. En el presente estudio se asumió una pérdida del 5% de la cantidad total, la capacidad de regeneración y la tasa de remoción no se encontró reportada en la literatura consultada.

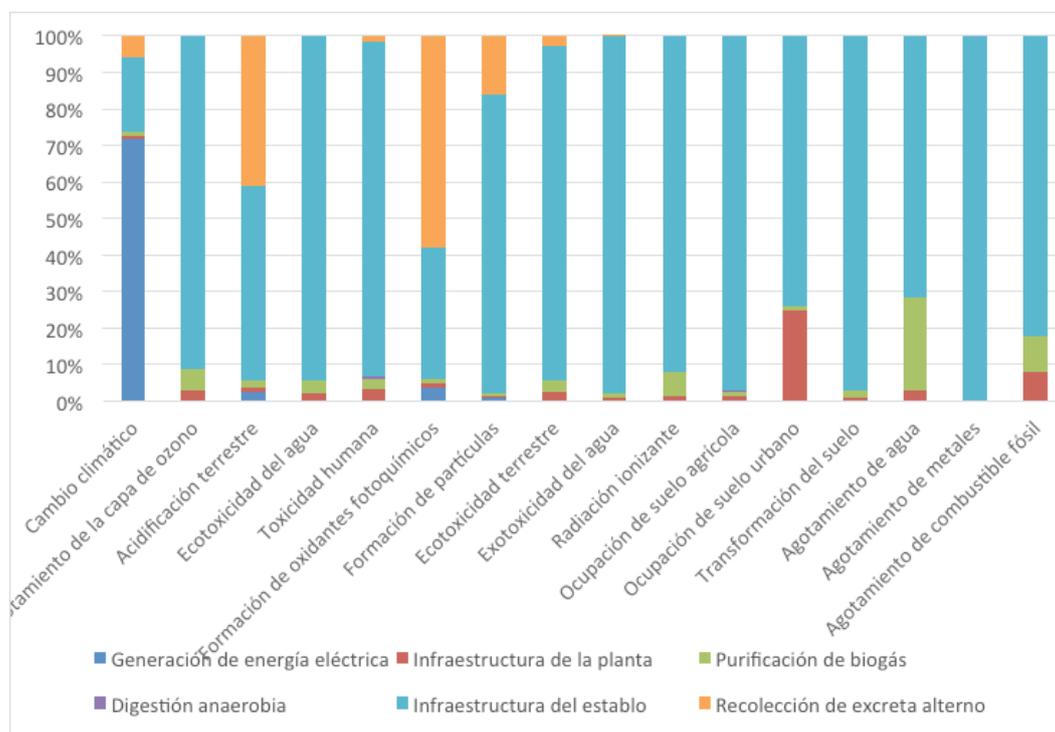


Figura 11.. Contribución de cada proceso unitario a las categorías de impacto.

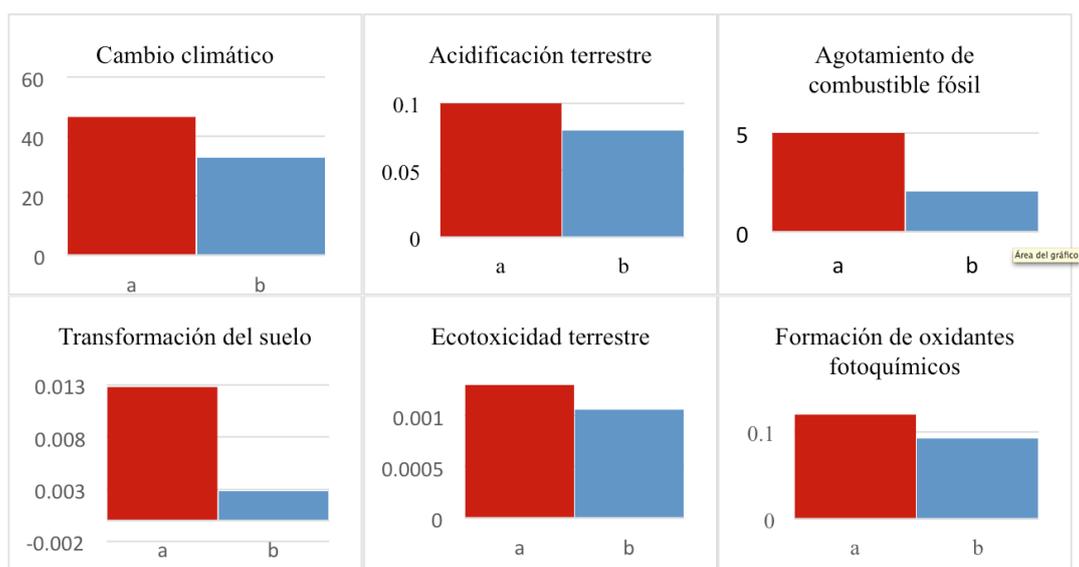


Figura 12. Categorías que tienen un efecto positivo en la inclusión de un sistema de purificación por MEA. a) proceso de generación de energía eléctrica mediante biogás con respecto a b) inclusión de un proceso de purificación con MEA.

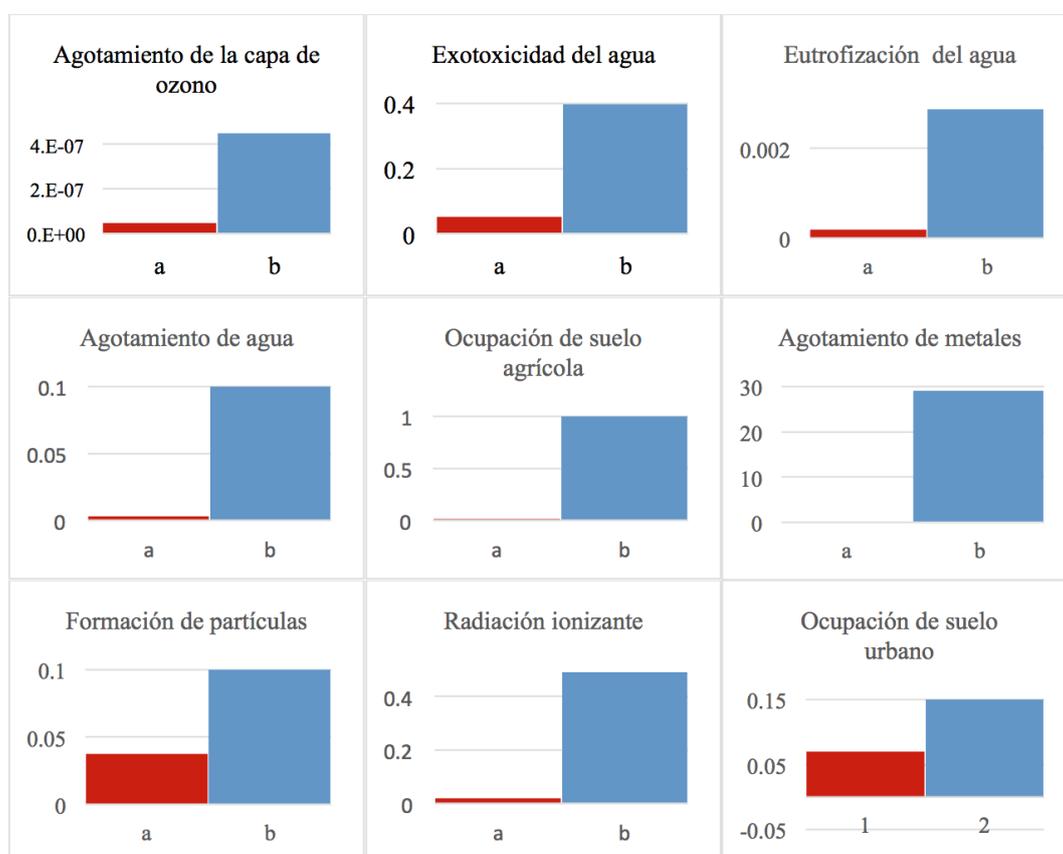


Figura 13. Categorías de impacto en las que tiene un efecto mayor al incluir el proceso de purificación por MEA. a) escenario actual de la generación de energía eléctrica mediante biogás; b) el proceso con la inclusión de un sistema de purificación.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la experimentación brindaron información valiosa para el desarrollo del ACV, así como para el diseño de una torre de purificación de biogás a gran escala. Se identificaron las temperaturas que favorecen la absorción y la desorción de H₂S y los tiempos de saturación del sistema. De acuerdo con los resultados del ACV se puede concluir que el uso de monoetanolamina en una torre empacada tiene efectos favorables para el medio ambiente en referencia a las emisiones al aire. Sin embargo, el agotamiento de recursos es un factor importante a considerar en este tipo de sistemas. Para lograr que el sistema de remoción por monoetanolamina presente una disminución en estos impactos, se recomienda la optimización del diseño del proceso y del programa de mantenimiento de los equipos del sistema de remoción. Se comprobó que la capacidad de regeneración de la monoetanolamina representa una ventaja en la minimización del impacto ambiental. Sin embargo, es importante identificar alternativas de solución al problema de las impurezas de biogás por lo que se recomienda evaluar otras tecnologías de remoción.

5. Referencias

- [1] IEA, "World Energy Balances: Overview," 2018.
- [2] J. Valle-Pereña and H. Ortega-Navarro, "Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026," *Secr. Energía*, pp. 1–156, 2012.
- [3] SENER, "Balance nacional de energía 2016," México, 2017.
- [4] FIRCO, "Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario," 2007.
- [5] D. Andriani, A. Wresta, T. D. Atmaja, and A. Saepudin, "A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO₂ Removal Using Various Techniques," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 172, no. 4, pp. 1909–1928, 2014.
- [6] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu, and X. Yu, "Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 521–532, 2015.
- [7] B. Morero, M. B. Rodriguez, and E. A. Campanella, "Environmental impact assessment as a complement of life cycle assessment. Case study: Upgrading of biogas," *Bioresour. Technol.*, vol. 190, pp. 402–407, 2015.
- [8] I. Ullah Khan et al., "Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage," *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, no. August, pp. 277–294, Oct. 2017.
- [9] ISO, ISO 14044:2006. 2006.
- [10] IMNC, NMX-SAA-14040-IMNC-2008. 2008.
- [11] E. A. Huerta Reynoso, "Análisis de Incertidumbre , en el Ciclo de Vida de la energía generada mediante biogás .," *Centro de Investigación en Materiales Avanzados*, 2017.
- [12] J. Lasocki, K. Kołodziejczyk, and A. Matuszewska, "Laboratory-scale investigation of biogas treatment by removal of hydrogen sulfide and Carbon Dioxide," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 24, no. 3, pp. 1427–1434, 2015.
- [13] O. I. Maile, H. Tesfagiorgis, and E. Muzenda, "The potency of monoethanolamine in biogas purification and upgrading," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 24, pp. 122–127, 2017.
- [14] JRC European commission, *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. 2011.

AUMENTO DE LA POTENCIA DE UNA CCM MEDIANTE EL USO DE UN CÁTODO MnO_2 SOPORTADO

SOBRE CARBÓN; SEDIMENTOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO COMO MO

Elizabeth Alemán Gama¹, Alberto A. Álvarez Gallegos¹, Sathish Kumar Kamaraj², Luis Ixtlilco³

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM, Avenida Universidad 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos.

²Universidad Politécnica de Aguascalientes, UPA, Calle Paseo, San Gerardo, 207, 20342 Aguascalientes, Aguascalientes. ³Instituto de Energías Renovables, IER-UNAM, Xochicalco, Azteca, 62588 Temixco, Morelos. elizabeth.gama@alumnos.uaem.mx

Resumen: Las celdas de combustible microbiana (CCM) son un sistema bioelectroquímico que generan energía renovable y que simultáneamente degradan contaminantes ricos en materia orgánica, mediante la actividad metabólica de las bacterias anaerobias. Los accidentes de derrames de petróleo causan gran impacto ambiental, contaminando grandes áreas de flora y fauna. Las CCMs han demostrado que puede biodegradar suelos contaminados con petróleo, y al mismo tiempo producir una energía útil. En este estudio se construyeron 11 CCMs. Se evaluó el desempeño de las CCMs con respecto al aumento en su densidad de potencia, se utilizó sedimentos contaminados con petróleo como materia orgánica (MO), materiales de fibra de carbón como ánodo y cátodo ($d=10\text{cm}$), el diseño de la celda fue en forma cilíndrica ($d=10\text{ cm}$ y $h=15\text{ cm}$), esta primera configuración fue denominada CCM-control. Posteriormente, se evaluó el desempeño adicionando dos tipos de derivados del petróleo como MO; queroseno y gasolina, a tres distintas concentraciones; 3, 9 y 15 g, denominadas CCM-3gQ, 9gQ, 15gQ, 3gG, 9gG y 15gG, respectivamente. También se utilizó dos tipos de MO fáciles de degradar; chitin natural y comercial para evaluar la facilidad de las bacterias en la eliminación de esta materia y el efecto en la producción de energía con respecto a cuándo se utiliza materia contaminada con petróleo. En todas las CCMs se evaluó la concentración del catolito; 0.05, 0.2, 0.5 y 0.8 M de sulfato de sodio y un pH; 2, 4, 6 y 8, con ácido sulfúrico. Para aumentar la cinética de la reacción de reducción de oxígeno (RRO) se utilizó un catalizador de MnO_2 . Las mejores densidades de potencia se obtuvieron trabajando a pH bajos de 2, a mayores concentraciones del catolito 0.08 M y con catalizador MnO_2 . La CCM-control se obtuvo una densidad de corriente y den-

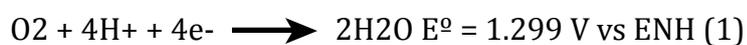
sidad de potencia de 44.99 mAm⁻² y 6.04 mWm⁻², respectivamente. Los mejores resultados se obtuvieron con queroseno como MO con 248.14 mAm⁻² y 183.78 mWm⁻².

Palabras clave: *Celdas de combustible microbianas, reacción de reducción de oxígeno, sedimentos contaminados con petróleo, biodegradación anaerobia.*

1. Introducción

Las CCMs utilizan bacterias para convertir la energía química almacenada en la materia orgánica (glucosa, sacarosa, acetato, citrato, glicerol, contaminantes tóxicos, materia derivada del petróleo, etc.) directamente a energía eléctrica [1-3]. La CCM convencional está constituida por un ensamble electrodo-membrana-electrodo. Su principio de funcionamiento consiste en que las bacterias anaerobias presentes en la cámara anódica llevan a cabo el proceso de oxidación de la MO sobre la superficie del electrodo liberando electrones (e⁻), protones (H⁺) y CO₂, principalmente. Los e⁻ son transportados por un circuito externo que alimenta una carga hacia la cámara catódica, mientras que los H⁺ viajan a través de una membrana intercambiadora de protones, donde estos reaccionan con los e⁻ y un oxidante (generalmente oxígeno por su abundancia y es gratis) para formar directamente agua, a este proceso se le conoce como reacción de reducción de oxígeno (RRO). Finalmente, los productos finales son energía eléctrica verde, y agua. Las CCMs también son conocidas como un sistema de tratamiento bioelectroquímico (BET) por su simultánea eliminación de contaminantes altamente tóxicos y complejos [4].

Sin embargo, las CCMs presentan bajas densidades de energía comparada con las celdas de combustible convencionales. Una de las limitantes es que ambos materiales ánodo y cátodo están hechos con base en platino (Pt) o de su grupo, conocidos como materiales preciosos, los cuales son muy caros y producir celdas de combustible a escala las hace incompetentes [3]. Actualmente se han unido esfuerzos para la búsqueda de nuevos materiales económicos, versátiles y amigables con el medio ambiente que puedan sustituir al Pt. En el ánodo se utiliza bacterias como catalizador anódico, mientras que, en el cátodo la RRO es una limitante debido a que es una reacción cinéticamente muy lenta. En un medio acuoso ácido la RRO presenta las siguientes reacciones:



Donde el máximo flujo de electrones, por un mecanismo de 4e⁻ (1) se produce utilizando Pt. En las últimas décadas esfuerzos se han generado para el estudio de la síntesis de catalizadores con propiedades electroquímicas similares al Pt. Varios óxidos de manganeso depositados sobre una superficie de carbón se han desarrollado para aplicaciones en bioceldas de combustible [5,6]. Recientemente, tres tipos de óxido de manganeso: α, β, y γMnO₂ fueron sintetizados y evaluados como catalizadores catódicos para la RRO en bioceldas [7], siendo β la fase más estable del dióxido de manganeso, debido a sus propiedades catalíticas, absorción molecular, facilidad de intercambio iónico y bajo costo [6].

El petróleo posee una gran cantidad de moléculas incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos, alifáticos, compuestos nitrógeno, azufre y oxígeno (NSO). Los derrames de petróleo siempre han ocasionado un gran impacto ambiental, dañando grandes áreas de flora y fauna, aunado al caro tratamiento, manejo y control de aguas provenientes en la extracción y producción de petróleo [8,9]. Con base en los problemas mencionados anteriormente, las CCM son una tecnología alternativa para llevar a cabo la eliminación de sustancias complejas como lo es el petróleo y sus derivas y que simultáneamente se está generando una corriente eléctrica útil.

Con base en lo anterior el objetivo de este estudio es construir y evaluar una celda de combustible microbiana, utilizando un catalizador catódico de MnO_2 para mejorar la velocidad de RRO y simultáneamente aumentar la potencia de salida de la CCM, al mismo tiempo remover contaminantes derivados del petróleo presentes en la materia orgánica.

Los objetivos específicos son:

1. Evaluar el efecto de la conductividad del catolito con distintas concentraciones de sulfato de sodio (Na_2SO_4): 0.05, 0.2, 0.5 y 0.8 M.
2. Evaluar el efecto de pH (adición de ácido sulfúrico) 8, 6, 4 y 2.
3. Evaluar el efecto de diferente materia orgánica (chitin natural, comercial, queroseno, gasolina) en la producción de energía.
4. Evaluar el efecto utilizando distintas concentraciones de MO (3, 9, 15 g).

2. Metodología

En este estudio se construyeron 11 CCMs, los materiales fueron: fibra de carbón como ánodo y cátodo ($d=10cm$), el diseño de la celda fue en forma cilíndrica ($d=10\text{ cm}$ y $h=14\text{ cm}$), esta primera configuración fue denominada CCM-control. Posteriormente, se construyeron 10 celdas fraccionando el ánodo en 4 secciones (ver figura 1). Se utilizó sedimentos contaminados con petróleo como materia orgánica (MO) y fuente natural de bacterias, extraídos de la laguna de Coatzacoalcos, Veracruz. Se evaluó el desempeño adicionando dos tipos de derivados del petróleo como MO; queroseno y gasolina, a tres distintas concentraciones; 3, 9 y 15 g, denominadas CCM-3gQ, 9gQ, 15gQ, 3gG, 9gG y 15gG, respectivamente. También se utilizó dos tipos de MO fáciles de degradar; chitin natural y comercial para evaluar la facilidad de las bacterias en la eliminación de esta materia y el efecto en la producción de energía con respecto a cuándo se utiliza materia contaminada con petróleo. En todas las CCMs se evaluó la concentración del catolito; 0.05, 0.2, 0.5 y 0.8 M de sulfato de sodio y un pH; 2, 4, 6 y 8, con ácido sulfúrico.

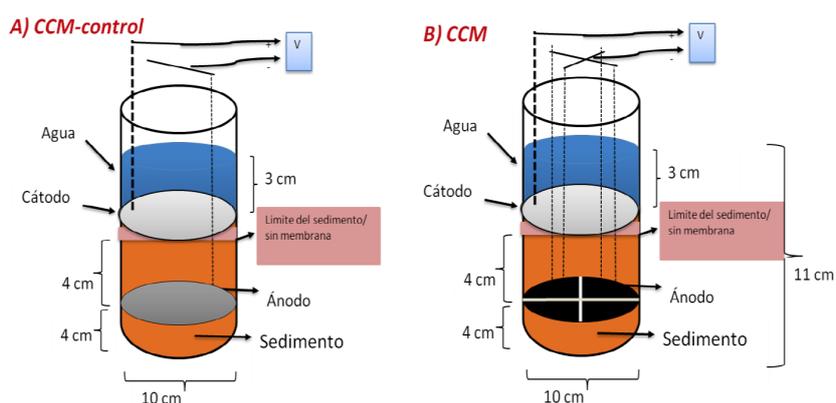


Figura 1. Esquema de configuración experimental utilizada en este trabajo, CCM con una sola cámara. A) Sedimentos contaminados con petróleo como MO, cátodo y ánodo ($d=10$ cm), denominada CCM-control. B) ánodo fraccionado en 4 secciones ($d=10$ cm).

Para aumentar la cinética de la reacción de reducción de oxígeno (RRO) se utilizó un catalizador de MnO_2 por medio de una reacción redox directa, sumergiendo el electrodo en una solución de permanganato de potasio (KMnO_4) 0.1 M, 80 °C a pH 2, durante 8 horas.

3. Figuras y Tablas

Las CCMs fueron conectadas a un sistema de adquisición de datos (Arduino uno, LabVIEW). Las curvas de polarización se obtuvieron variando la resistencia externa de 32 a 0.5 k Ω . La densidad de corriente se calculó con la ley de Ohm: $V=(I \cdot R)/A$. Las curvas de densidad de potencia se calcularon con la ecuación $P=(I \cdot V)/A$. A, es el área geométrica con respecto al ánodo y V, el voltaje medido con respecto a la resistencia externa. En la figura 2 se muestra la instalación final de las celdas de combustible. Las celdas se dejaron a circuito abierto con una resistencia externa máxima de 38 k Ω , para el tiempo de aclimatación de las bacterias y obtención del máximo voltaje. El voltaje máximo (0.65-0.7 V \pm 0.5 mV) estable se obtuvo a los 40 días.

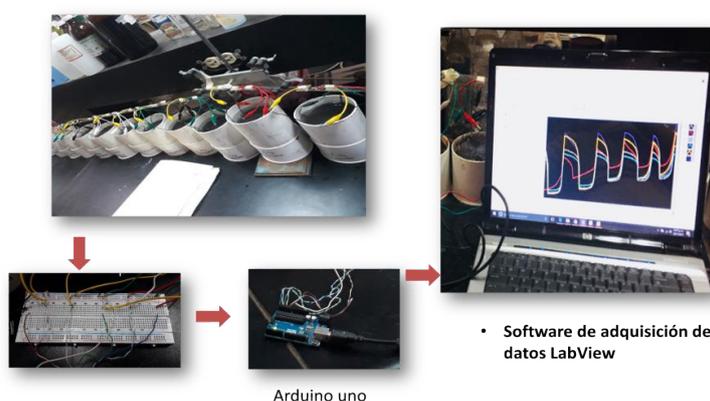


Figura 2. Instalación de CCMs conectadas a un sistema de adquisición de datos (Arduino Uno, LabVIEW).

En la figura 3 se muestra las curvas de polarización (A) y sus respectivas densidades de potencia (B) evaluando el efecto de 4 distintas concentraciones del catolito; 0.05, 0.2, 0.5 y 0.8 M. Como materia orgánica se utilizó lodos contaminados con petróleo y se le adiciono 3 g de queroseno, (denominada CCM-3g Q) Fuentes y colaboradores [3] estudiaron la influencia en el aumento en la concentración del catolito atribuyendo que a mayores concentraciones (Na_2SO_4 1M) se genera un incremento en la conductividad iónica, lo que ayuda al transporte de H^+ y difusión de oxígeno sobre la superficie del electrodo para mejorar la velocidad de reacción de reducción de oxígeno. En este estudio las máximas densidades de potencia se obtuvieron a una concentración de 0.8 M, a mayores concentraciones genera un efecto inhibitor sobre las bacterias, ocasionando un bajo desempeño de la CCM. Todas las celdas de evaluaron con catalizador catódico MnO_2 . En la celda control no se utilizó catalizador ni sulfato de sodio.

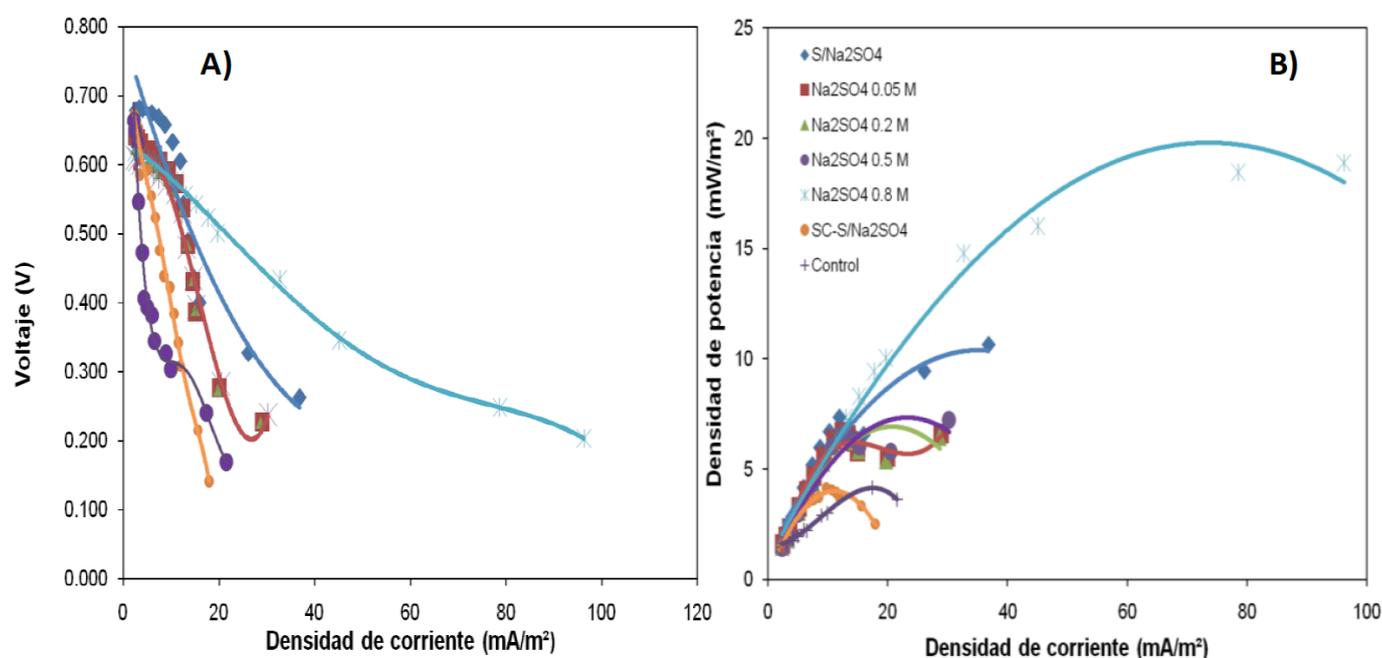


Figura 3. CCM-3g Q. A) Curvas de polarización; B) curvas de densidad de potencia. Catalizador catódico MnO_2 , MO (sedimentos contaminados con petróleo + 3 g de queroseno). —+ Control; ◆ S/ Na_2SO_4 ; ■ Na_2SO_4 0.05 M; ▲ Na_2SO_4 0.2 M; ● Na_2SO_4 0.5 M; × Na_2SO_4 0.8 M; ● SC-S/ Na_2SO_4 .

La cantidad de protones que se producen en el ánodo tienen que difundir una distancia de 4 cm de sedimento hacia el cátodo, lo que aumenta la resistencia interna y la velocidad de protones es lenta en el ánodo por su baja conductividad, por lo tanto, hay poca cantidad de protones en el cátodo para que puedan reaccionar con el oxígeno [10,11]. En la figura 4 se muestra los resultados obtenidos variando el pH del catolito, obteniendo los mejores resultados a pH bajos, por la alta cantidad de H^+ presentes en el medio.

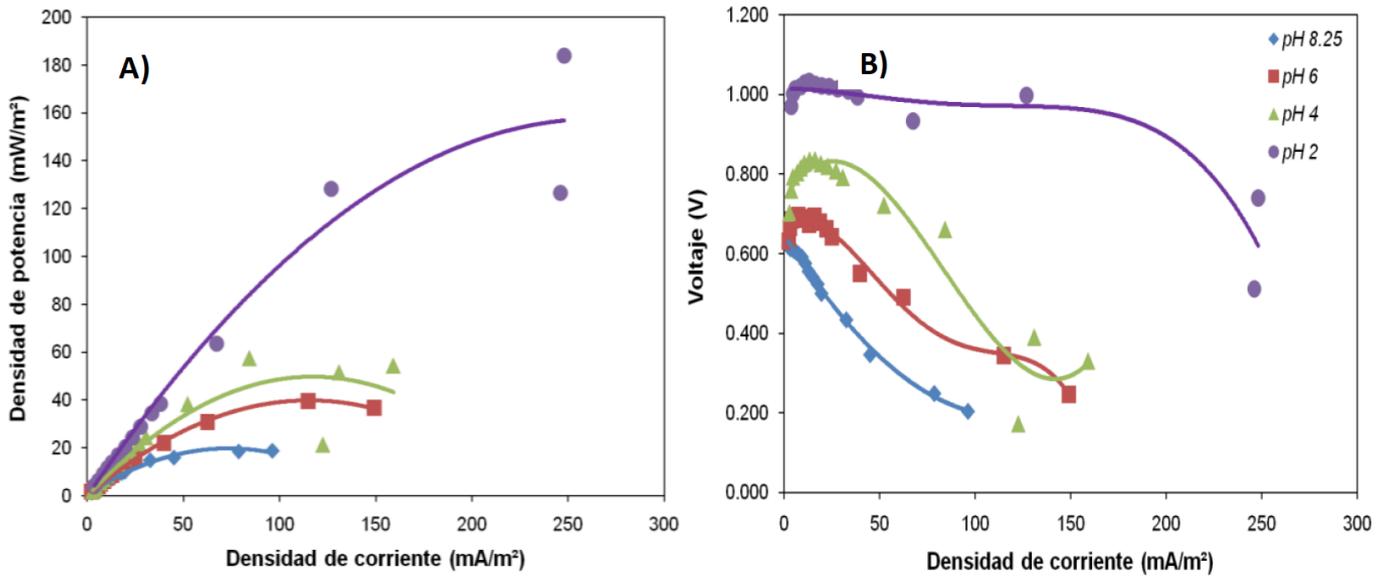


Figura 4. CCM-3g Q. A) Curvas de polarización; B) Curvas de densidad de potencia. Catalito Na_2SO_4 0.8 M, catalizador catódico MnO_2 , MO (sedimento de lodos contaminados con petróleo + 3 g de queroseno). ♦ pH 8.25; ■ pH 6; ▲ pH 4; ● pH 2.

En la figura 5, se muestra los resultados variando la cantidad de la materia orgánica a pH bajo (2) y mayor concentración del catalito (0.8 M). Las mayores densidades de potencia se obtienen a menores concentraciones de MO (3 g queroseno).

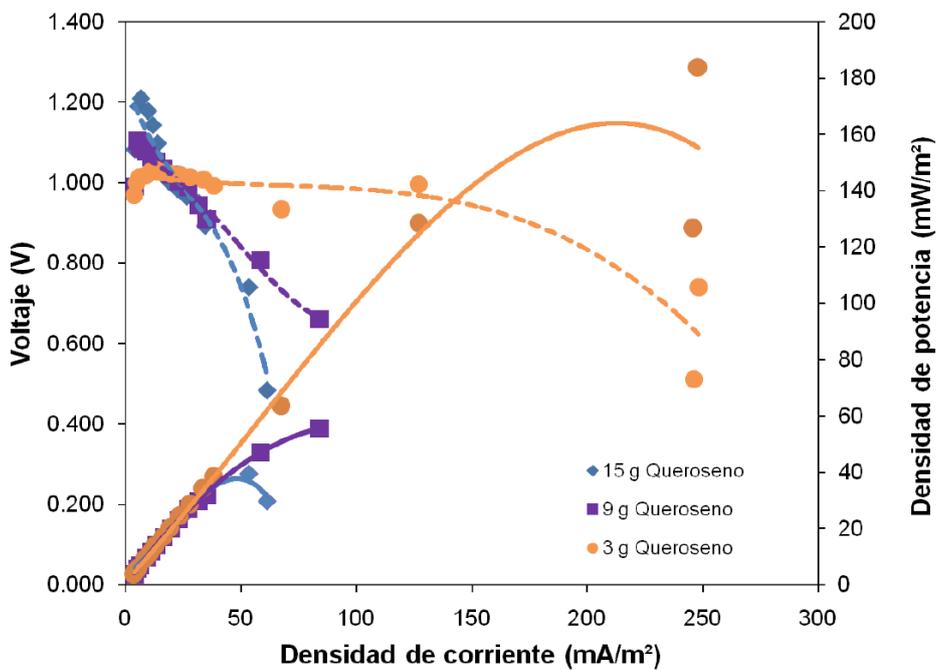


Figura 5. Curvas de polarización (●●●); Curvas densidad de potencia (—). Catalito Na_2SO_4 0.8 M, catalizador catódico MnO_2 , MO (sedimento de lodos contaminados con petróleo). ♦ 15 g Queroseno; ■ 9 g Queroseno; ● 3 g Queroseno.

Chandrasekhar y colaboradores [9] estudiaron el efecto de diferentes cargas de MO (lodos contaminados con petróleo) 3, 9, 15 y 30 g, obteniendo mayor actividad electrogénica con menores cargas de MO (3 g) 343 mV; 53.11 mWm⁻².

En la figura 6 se muestra el efecto en el desempeño de la CCM adicionando una MO (chitin natural) más fácil de degradar con respecto a un derivado del petróleo (gasolina o queroseno), y utilizando dos distintas cargas (3 y 8 g). Con una materia más fácil de degradar a mayores concentraciones (8 g) se obtiene mejores densidades de potencia 254.2 mV; 91.35 mWm⁻².

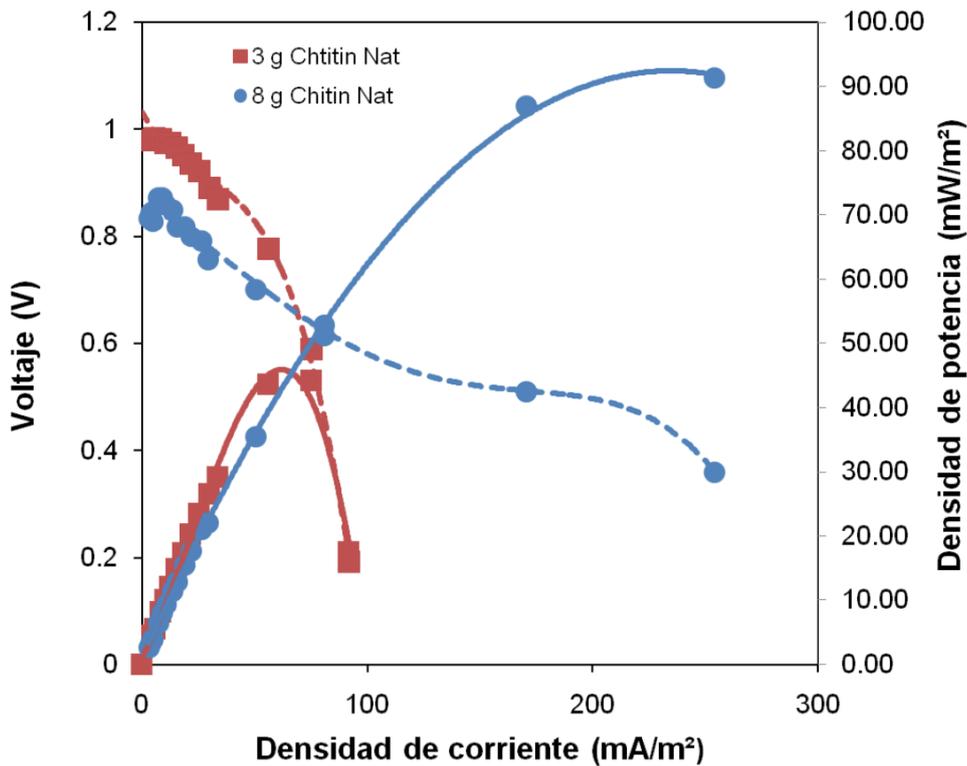


Figura 6. Curvas de polarización (●●●); Curvas densidad de potencia (—). Catolito Na₂SO₄ 0.8 M, catalizador catódico MnO₂, MO (sedimento de lodos contaminados con petróleo). ■ 3 g Chitin Nat; ● 8 g Chitin Nat

En la tabla 1 se muestran los mejores resultados obtenidos bajo las condiciones óptimas de operación; pH 2, 0.8 M de Na_2SO_4 y catalizador catódico MnO_2 . Utilizando gasolina como MO genera un efecto inhibitorio sobre las bacterias por lo cual se observan bajas densidades de energía 19.79 mWm^{-2} . 3.

CCM	Catolito	pH catolito	Voltaje (V)	Densidad de corriente ($\text{mA}\cdot\text{m}^{-2}$)	Densidad de potencia ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)
Control	Agua	8.35	0.240	17.39	4.18
3 g Queroseno	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.740	248.14	183.78
9 g Queroseno	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.661	84.14	55.6
15 g Queroseno	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.739	53.49	39.55
3 g Chitin Nat	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.590	75.09	44.29
8 g Chitin Nat	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.359	254.2	91.35
3 g Chitin Com	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.731	88.74	61.99
3 g Gasolina	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.416	30.11	12.53
9 g Gasolina	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.523	37.82	19.78
15 g Gasolina	Na_2SO_4 0.8 M	2	0.572	15.84	9.07

Tabla 1. Tabla comparativa con las mejores condiciones de estudio; pH 2, 0.8 M de Na_2SO_4 . En todas las pruebas se utilizó el catalizador MnO_2 .

4. Conclusiones

1. La CCM presentó un mejor rendimiento a pequeñas cargas de materia orgánica (3 g).
2. La CCM alimentada con queroseno a bajas concentraciones (3 g), a pH bajos (2), y catalizador de MnO_2 presentan un efecto sinérgico en el desempeño de la CCM, obteniendo las mejores densidades de potencia de 183 mWm^{-2} .
3. Las bacterias naturalmente presentes en los lodos contaminados con petróleo pueden producir electricidad mediante su metabolismo, lo cual, no se requiere de una comunidad microbiana pura.

5. Referencias

- [1] Panpan L., Peng L., Yong J., Wen H., Bo M., Donglin W., Xia H. Stimulated electron transfer inside electroactive biofilm by magnetite for increased performance microbial fuel cell, (*Applied Energy*, 2018), pp. 382-388.
- [2] Payel C., Uma S. P. U., Nibedita M., Onkar N. T., Rup N. Y., Tarun K. B., Biswanath B. Performance improvement of microbial fuel cells for waste water treatment along with value addition: A review on past achievements and recent perspectives, (*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017), pp. 372-389.
- [3] Fuentes A. C., Del Razo A., Juarez K., Alvarez G. A. Influence of NaCl, Na₂SO₄ and O₂ on power generation from microbial fuel cells with non-catalyzed carbon electrodes and natural inocula, (*Solar Energy*, 2012), pp. 1099-1107.
- [4] Venkata Mohan S., Chandrasekhar K. Self-induced bio-potential and graphite electron accepting conditions enhances petroleum sludge degradation in bio-electrochemical system with simultaneous power generation, (*Bioresource Technology*), pp. 9532-9541.
- [5] Wen Q., Wang S., Yan J., Cong L., Pan Z., Ren Y., Fan Z. MnO-graphene hybrid as an alternative cathodic catalyst to platinum in microbial fuel cell, (*Journal of Power Sources*, 2012), pp.187-191.
- [6] Zhang Y., Li Y. H. Z., Sun J., Hou B. Manganese dioxide-coated carbon nanotubes as an improved cathodic catalyst for oxygen reduction in a microbial fuel cell, (*Journal of Power Sources*, 2011), pp. 9284-9289.
- [7] Lu M., Kharkwal S., Ng H., Li S. F. Carbon nanotube supported MnO₂ catalyst for oxygen reduction reaction and their applications in microbial fuel cells, (*Biosensors and Bioelectronics*, 2011), pp. 4728-4732.
- [8] Pratiksha J., Sandipam S., Manoj K., Priyangshu M. S., Singh M. P., Banwari L. Bio-electro catalytic treatment of petroleum produced water: Influence of cathode potential upliftment, (*Bioresource Technology*, 2016), pp. 652-658.
- [9] Chandrasekhar K., Venkata Mohan S. Bio-electrochemical remediation of real field petroleum sludge as an electron donor with simultaneous power generation facilitates biotransformation of PAH: Effect of substrate concentration, (*Bioresource Technology*, 2012), pp. 517-525.
- [10] Sleutels H.J.A. T., Hamelers V.M. H., Buisman N.J. C. Effect of mass and charge transport speed and direction in porous anodes on microbial electrolysis cell performance, (*Bioresource Technology*, 2011), pp. 399-403.
- [11] Torres I. C., Marcus K. A., Rittmann E. B. Proton Transport Inside the Biofilm Limits Electrical Current Generation by Anode-Respiring Bacteria, (*Biotechnology and Bioengineering*, 2008), Vol, 100, No. 5.

ANÁLISIS DE UN ARREGLO DE CUATRO AEROGENERADORES DE 2 MW EN CIENEGUILLAS, ZACATECAS

Carlos Francisco Morales Ruvalcaba ^{*1} and Osvaldo Rodríguez Hernández ²

¹Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables, Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34, 62580 Temixco, Mor., México

²Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34, 62580 Temixco, Mor., México

Resumen: Se analizó un parque de cuatro aerogeneradores Vestas V90-2MW ubicado en Cieneguillas, Zacatecas. Se propuso un arreglo de los aerogeneradores para optimizar la producción de energía en el lugar aumentando el factor de capacidad en 3% hasta 20.4% respecto a un primer arreglo regular de referencia utilizando un mapa de recurso de la región y considerando las velocidades preferentes. Con este arreglo de aerogeneradores se logra una producción de 15.8 GWh/año de electricidad suficiente para abastecer a 7900 hogares mexicanos. Es posible instalar los aerogeneradores en el sitio, considerando que aún se deben realizar los estudios tecno-económicos.

1. Introducción

En este trabajo se analizó un arreglo de cuatro aerogeneradores Vestas V90-2MW en un sitio ubicado en Cieneguillas, Zacatecas y, de acuerdo a las características del viento en el sitio, se optimizó la ubicación de los aerogeneradores en el área. Este sitio está dentro de una de las regiones de estudio del potencial eólico en México.

México es un país con buenos sitios donde es posible aprovechar la energía eólica para la producción de electricidad. A nivel mundial está posicionado como uno de los mejores sitios, con algunas regiones como Oaxaca con velocidades promedio de 8 m/s y factores de planta cercanos al 45 %. Durante los últimos años se han desarrollado estrategias y políticas para contribuir a que la generación eléctrica con fuentes renovables se acelere. Uno de los principales objetivos es la integración de la energía eólica a la matriz energética [1].

Al final del primer semestre de 2017, en México la capacidad instalada de fuentes renovables fue de 18,786 MW, de los cuales 3,942 MW correspondieron a energía eólica [3]. Se espera que entre 2016 y 2020 se adicionen 6,631 MW de capacidad, así como que entre 2024 y 2027 se agreguen otros 5,366

MW para que en 2030 se tenga una capacidad instalada total de 15,101 MW distribuida por varias regiones en todo el país, principalmente en Oaxaca y Tamaulipas como se puede observar en la figura 1 [4].

Para la instalación de parques eólicos es necesario tener un sitio con las mejores condiciones de operación. Es muy deseable que la velocidad de viento sea estable y se encuentre entre el valor nominal y el de corte del equipo que se quiere instalar en el sitio. Si esto no ocurriera, para aprovechar la mayor cantidad de energía sería más conveniente buscar otro sitio con condiciones más adecuadas, o utilizar otro equipo con diferentes características de operación.



Figura 1: Velocidad promedio a 200 m de altura, resolución de 1 km [2].

Cuando se detecta un sitio con alto potencial de aprovechamiento para la generación eolieléctrica, antes de cualquier paso adicional se debe realizar un análisis cuantitativo del comportamiento del viento en el sitio, para esto existen varias metodologías que se pueden seguir [6]. También se requiere determinar el tipo de equipo con el cual se va a realizar la generación, así como la distribución espacial de los aerogeneradores. La distribución de los aerogeneradores es limitada por la disponibilidad del terreno debido a costo o afectaciones a poblaciones. En general, siempre se buscará colocar la mayor cantidad de aerogeneradores en la menor cantidad de área. Sin embargo, colocar los aerogeneradores muy próximos ocasiona pérdidas por efectos de estela, es decir, que si un aerogenerador está atrás y muy cercano a otro, el viento será más turbulento y la velocidad será menor que para el primer aerogenerador. Por lo

tanto, se debe analizar dentro del terreno disponible cuál es la mejor configuración para evitar las pérdidas en la producción y tener la granja eólica con la distribución más eficiente de acuerdo a las características del viento en el sitio, como lo son velocidad media y direcciones preferentes.

Entre más complejo es el terreno de la granja eólica y menos información se tenga de las proximidades el modelo será menos exacto [7]. Una alternativa, menos utilizada pero aún así útil, es el modelado a escala de la granja eólica para el posterior análisis de las interacciones aerodinámicas dentro de un túnel de viento.

En este trabajo se estudió un sitio en Cieneguillas, Zacatecas, ubicado a 2,050 msnm con latitud 22°, 43' 20" norte y longitud 102° 41' 10" oeste; región árida con muy poca población y mucho campo agrícola. Zacatecas es un estado que tiene varios sitios promisorios y varios proyectos eólicos que sumarán 403 MW de capacidad instalada para el 2030 [1]. Para el análisis de este sitio se tuvieron mediciones de viento por un periodo de 19 meses a 20 y 40 m de altura con una resolución de 10 minutos. Primero se propuso un arreglo regular determinado de cuatro aerogeneradores, que luego de caracterizar el terreno cercano, se utilizó el modelo de estela de Jensen [8], así como el modelo de obstáculos [9] para estimar las pérdidas ocasionadas por el arreglo de los aerogeneradores y se propuso un nuevo arreglo que disminuyera estas pérdidas.

Primero se describirá el problema a detalle junto con los antecedentes teóricos requeridos para el desarrollo de la solución. Después se presentarán los resultados obtenidos luego de llevar a cabo el procedimiento descrito. Por último se presentarán las principales conclusiones a que se llegó luego de este estudio y algunas propuestas para mejorar la metodología y el aprovechamiento en el sitio elegido.

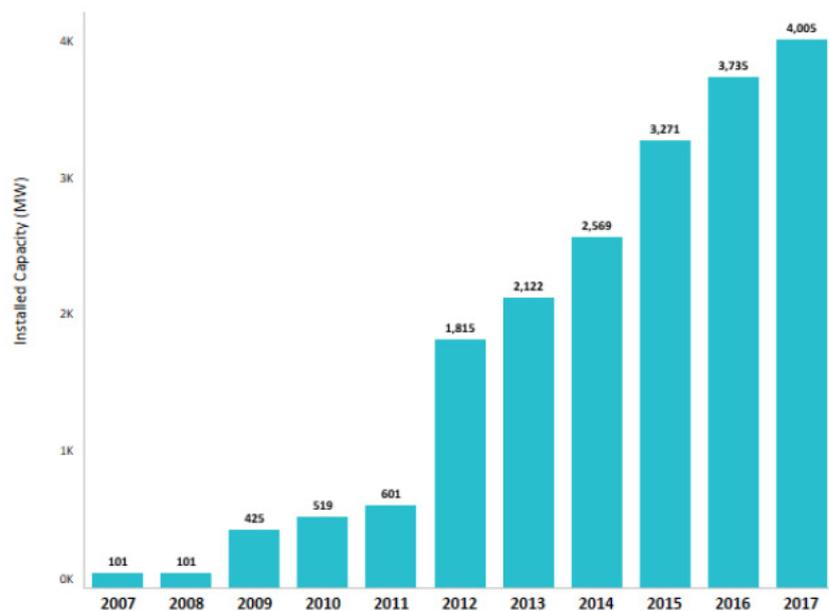


Figura 2: Capacidad instalada para la generación de electricidad con energía eólica en México a finales de 2017 [5].

2. Marco teórico

A diferencia de otros recursos renovables como el sol, que depende principalmente de la latitud del sitio, el viento suele ser menos predecible. En las características del viento en una región influyen diversos factores como la orografía, la localización, la cercanía a poblaciones, el tipo de terreno que existe alrededor, entre otros; debido a estos factores, se vuelve más compleja la estimación de recurso eólico. Por lo tanto, aun cuando se cree que un sitio tiene potencial de aprovechamiento, es conveniente tener un histórico del viento en el lugar. Por lo general si el sitio no está cercano a una estación de servicios meteorológicos o de otro carácter que mida intensidad y dirección de viento sería necesario instalar una estación instrumentada con este objetivo. Además de anemómetro para medir la velocidad y veletas para la dirección, en ocasiones también se mide la temperatura ambiente y la presión ya que esta información también es útil en el análisis [7]. Es necesario realizar una recolección de datos por un periodo mínimo de entre uno y dos años, con el objetivo de registrar el viento y poder detectar los cambios mensuales e interestacionales. Con los datos recolectados se reconstruyen los histogramas de la velocidad y dirección del viento principalmente. Con posteriores análisis se calcula la frecuencia con que se presentó el viento a determinada velocidad o determinada dirección, las cuales se pueden observar con facilidad con una gráfica de rosa de vientos. A partir de la información obtenida se utiliza modelos estadísticos, como la distribución Weibull, que reflejan el comportamiento del sitio como se describe en las siguientes secciones.

2.1. Estimación de la energía anual producida en un sitio

Para hacer la estimación de la energía anual producida en un sitio se utiliza el siguiente modelo matemático descrito en Manwell [7]. Dada una función de probabilidad $p(U)$ de la velocidad de viento y una curva de potencia conocida de un aerogenerador $P_w(U)$, la potencia promedio del aerogenerador está dada por:

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U)p(U)dU \quad (1)$$

Una de las funciones de distribución de probabilidad más utilizadas en el análisis de viento es la distribución Weibull. La utilización de esta función requiere de dos parámetros: el factor de forma k y el factor de escala c . Ambos parámetros son funciones de U y σ_U . La función de densidad de probabilidad de Weibull está dada por:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Los parámetros k y c son calculados y estimados por medio de métodos analíticos y empíricos. La función de distribución de probabilidad nos ayuda a conocer en qué velocidades de viento tendremos que hacer más énfasis en un sitio dada su frecuencia. Por lo general es más probable tener vientos con velocidades bajas que vientos a altas velocidades.

2.2. Capa límite atmosférica y rugosidades

Tipo de Rugosidad	Longitud de Rugosidad	Energía Relativa %	Descripción
0	0.0002	100	Áreas de agua.
0.0	0.0024	73	Agua y tierra or tierra muy suave.
1	0.03	52	Zonas agrícolas sin protecciones y edificios dispersos. Sólo lomas pequeñas.
1.5	0.055	45	Zona agrícola con algunos edificios y protecciones de 8 m de altura y separados 1250 m.
2	0.10	39	Zona agrícola con algunos edificios y protecciones de 8 m de altura y separados 800 m.
2.5	0.20	31	Zona agrícola con apariencia cerrada y vegetación densa, protecciones de 8 m de altura y separados 250 m.
3	0.40	24	Villas, pequeños pueblos, zonas agrícolas muy cerradas con muchas protecciones altas, bosques, cambios orográficos abruptos, etcétera.
3.5	0.80	18	Pueblos grandes, ciudades con áreas construidas extensas.
4	1.6	13	Grandes ciudades con áreas construidas y edificios altos.

Cuadro 1: Rugosidades de diversos tipos de terreno (altura de rugosidad en metros) [10].

La capa límite atmosférica es la parte más baja de la atmósfera y está directamente incluida por la superficie terrestre. En ella, variables físicas como velocidad, temperatura y humedad relativa pueden cambiar rápidamente en espacio y tiempo. Un parámetro importante en la caracterización del recurso eólico es la variación de la velocidad horizontal del viento respecto a la altura sobre el nivel del suelo, a ésta se le conoce como el perfil de la velocidad de viento. Gracias a esta caracterización del perfil de la velocidad de viento es posible extrapolar datos medidos a una altura (en la estación de medición) para una altura mayor (altura de buje del posible aerogenerador). Se suelen utilizar dos modelos matemáticos para representar el perfil de viento los cuales son una combinación de estudios teóricos y empíricos.

A continuación se presentan ambos:

- *Perfil Logarítmico*. Asumiendo que en la superficie de la tierra la velocidad del viento es cero, el incremento de la velocidad dependiente de la altura estaría detenido por la siguiente ecuación:

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3)$$

donde $U(z)$ es la velocidad del viento en función de la altura z , k es la constante de von Karman, u^* es la velocidad de fricción y z_0 la altura de referencia de la rugosidad. En ocasiones se utiliza la ecuación:

$$U(z)/U(z_r) = \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) / \ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right) \quad (4)$$

para extrapolar las velocidades de viento desde una altura de referencia z_r a otra altura [7].

- *Perfil Exponencial*. Este tipo de perfil está representado con un modelo simple para extrapolar velocidades de viento que se define por la siguiente ecuación:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (5)$$

donde la velocidad $U(z)$ a la altura z se obtiene a partir de la velocidad $U(z_r)$ a la altura de referencia z_r , y α es el exponente que se obtiene a partir de diversas correlaciones que consideran la altura de rugosidad z_0 [7].

Es posible utilizar valores de altura de rugosidad de referencia z_0 de acuerdo a las características del terreno como se muestran en el siguiente cuadro 1. Estos valores predeterminados son de suma utilidad para caracterizar el terreno cercano a un sitio de estudio, ya que presentan los tipos de rugosidad más comunes.

2.3. Modelo de estela de aerogeneradores

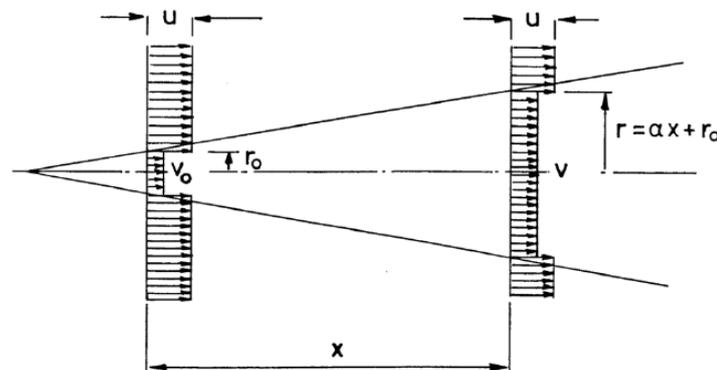


Figura 3: Modelo de estela de Jensen [8].

Un aerogenerador desacelera el aire que pasa por él tal que una estela de baja velocidad es formada. Esta estela es gradualmente disipada debido a efectos viscosos y mezclado turbulento. Sin embargo, cuando el flujo de aire pasa por otro aerogenerador antes de que la recuperación sea completada, la producción de potencia del segundo aerogenerador será menor que la del primero. Su producción dependerá de la posición relativa al primer aerogenerador [11].

El modelo de estela de Jensen [8] desprecia el campo posterior cercano al aerogenerador, y trata a la estela resultante como una estela turbulenta o corriente negativa. La extensión de área del déficit de momento del modelo significa que la dimensión lineal r es proporcional a la distancia aguas abajo x . El balance de momento queda expresado como:

$$\pi r_o^2 v_o + \pi(r^2 - r_o^2)u = \pi r^2 v \quad (6)$$

donde v_o es la velocidad apenas detrás del rotor, u es la velocidad del viento del ambiente y v es la velocidad en la estela a una distancia x del aerogenerador. Resolviendo para v y asumiendo una estela lineal ($r = \alpha x$) y la velocidad apenas detrás del rotor igual a $1/3u$ de acuerdo a la teoría clásica, se obtiene que:

$$v = u \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{r_o}{r_o + \alpha x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

donde α es la constante de arrastre con un valor normalmente aproximado a 0.1. A pesar de ser un modelo matemáticamente sencillo y una simplificación física del problema, el modelo de Jensen da un buen primer acercamiento del análisis del problema, así como estimación de las pérdidas por estela.

2.4. Modelo de obstáculos

Al caracterizar un sitio, todos los obstáculos individuales con altura mayor a un cuarto de la altura de buje de la turbina eólica y cerca de 1 km de distancia deben ser manejados como obstáculos locales y no como rugosidades. Estos obstáculos deben contener las dimensiones con la mayor exactitud posible. Además, si son menores a un cuarto de la altura de buje o más allá de 1 km de distancia se clasifican como rugosidades. Otra información importante para su caracterización es la porosidad que tienen, así como su geometría. En la figura 4 se puede observar cómo se ve afectada la velocidad de viento debido a los obstáculos [9].

3. Metodología

Con los datos recolectados en el sitio, se realizó un análisis estadístico para calcular la velocidad promedio en el sitio, así como la frecuencia de las direcciones y magnitud promedio para cada dirección. Con esta información también se hizo el cálculo de energía anual producida para un aerogenerador Vestas V-90 de 2 MW posicionado en el mismo punto que la estación de medición.

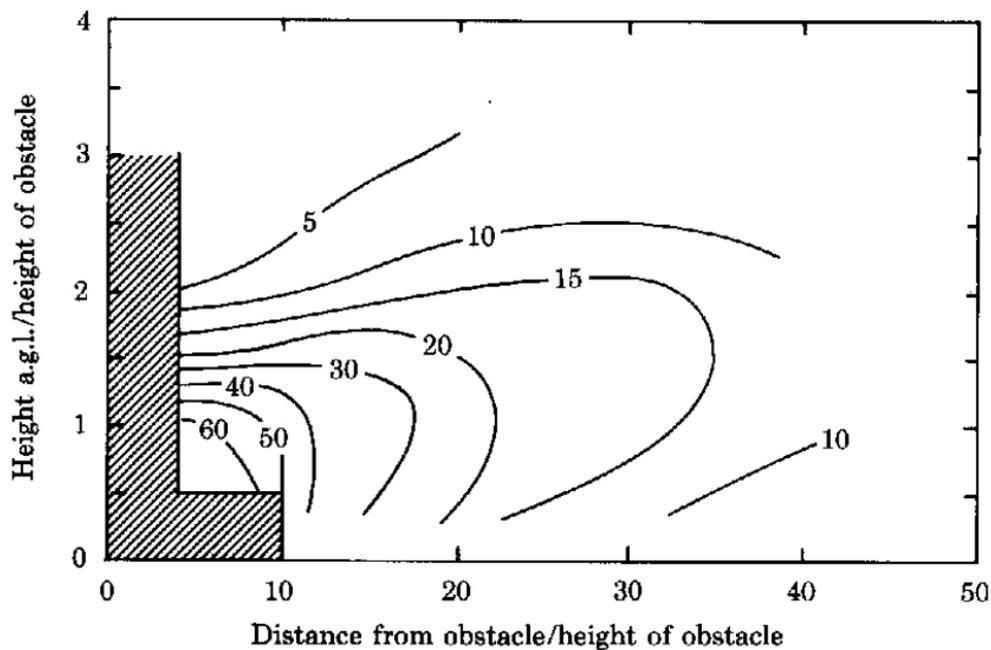


Figura 4: Afectación de la velocidad de viento respecto a la ubicación y altura del obstáculo [9].

Utilizando la posición de la estación como centro de nuestro arreglo regular de cuatro aerogeneradores colocados en los vértices de un cuadrado de 200 m por lado se realizó una nueva estimación de la energía anual producida para cada aerogenerador y para el total del conjunto. En esta nueva estimación, se consideró la rugosidad, orografía y obstáculos en el terreno circundante a nuestro arreglo de aerogeneradores. Además, al tratarse de un conjunto de aerogeneradores, los efectos de estela ocasionados por cada aerogenerador llegan a ocasionar pérdidas en los otros equipos. Estas pérdidas también se estimaron utilizando el modelo simplificado de Jensen [8], con el cual las interacciones entre los aerogeneradores se aproximan con el modelo descrito en la sección anterior.

Una vez que se obtuvieron los resultados de energía anual producida para el arreglo cuadrado de aerogeneradores, se realizó otra propuesta de arreglo con la cual las pérdidas disminuyeran. Para esta nueva propuesta se hizo un mapa de recurso eólico de la región cercana a la estación de medición. El mapa de recurso eólico marca el potencial que tiene cada punto con cierta resolución, en este caso las partes más altas presentaban un mayor potencial, pero también las más alejadas de obstáculos y en terrenos con una rugosidad menor. A pesar de que el mapa fue buena referencia para realizar una nueva propuesta de arreglo, también se consideraron los vientos preferentes en la región, para evitar que los aerogeneradores se colocaran en un arreglo paralelo a estos vientos preferentes.

Por último, el nuevo arreglo fue sujeto al mismo cálculo de energía anual producida individual y total para hacer una comparación respecto al arreglo inicial y verificar qué tanta mejora se logró.

4. Resultados

4.1. Estadística del sitio

Se calcularon parámetros del comportamiento del viento en el sitio con los datos de 19 meses de mediciones recopiladas entre febrero de 2005 y agosto de 2006. Con este histórico de datos se obtuvo que la velocidad media en el sitio a 80 m fue de 5.61 m/s y la densidad de energía de 1,555 kWh/m², con lo que el Vestas V90-2MW tiene un factor de capacidad (FC) de 20 %. Sin embargo, con la función de distribución de probabilidad Weibull (figura 6) obtenida a partir de los datos se tiene una velocidad media mayor de 5.72 m/s, aunque una densidad de energía producida menor de 1,368 kWh/m² y un FC de 19.1 %.

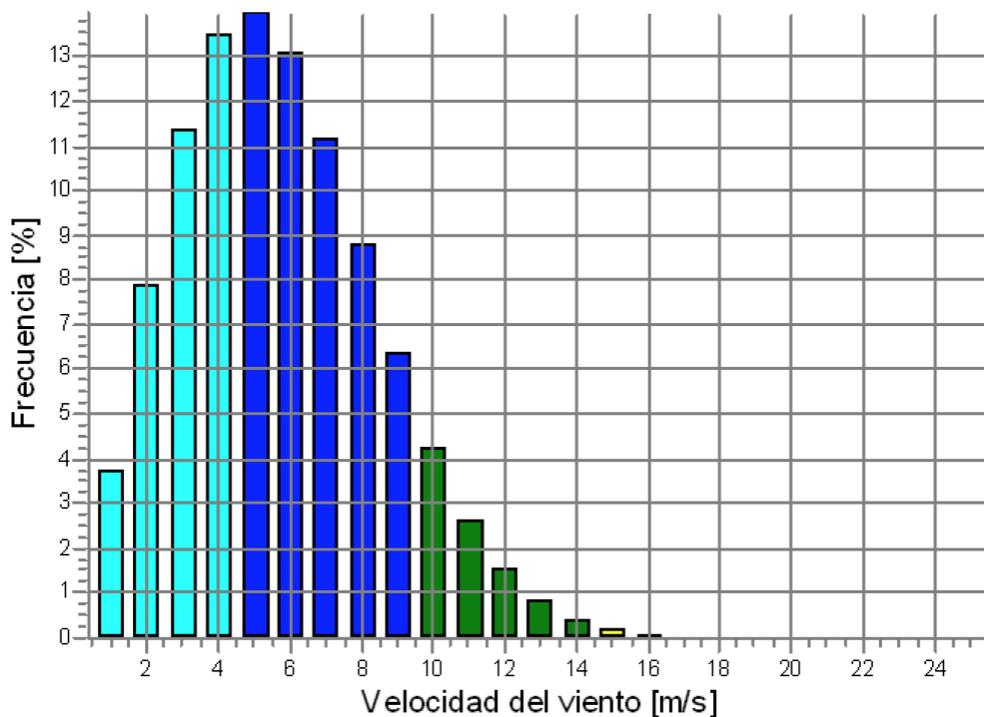


Figura 5: Distribución de probabilidad Weibull de la velocidad de viento a 80 m.

Debido a que las velocidades de viento más frecuentes son cercanas a 5.7 m/s, a esta velocidad la producción de potencia de la turbina eólica es de aproximadamente 200 kW, por lo tanto esto afecta al FC de la turbina eólica al encontrarse la mayoría del tiempo operando por debajo de su velocidad nominal de 14 m/s. Como se puede ver en la figura 5, las velocidades con una mayor frecuencia son las que tienen dirección sursudoeste y estesudeste, las cuales además tienen velocidades medias aproximadas a 6 m/s. En la misma figura 5 también se puede observar la densidad de energía respecto a la dirección, con lo que la más importante es la sursudoeste con cerca de 500 kWh/(m²año), seguido de la dirección este, estesudeste y oestesudoeste con aproximadamente la mitad de este valor.

Conforme a los datos de densidad de energía se dice que la dirección más importante para la producción de potencia es la sursudoeste ya que es la responsable de un tercio de la posible producción total en el sitio. Tanto en el análisis de los datos medidos directamente como en la distribución Weibull los vientos preferentes y la producción de potencia tienen la misma jerarquía en la dirección. Sin embargo, las magnitudes varían ligeramente debido a que la distribución Weibull aunque se ajusta muy bien, no representa de manera idéntica las mediciones realizadas directamente. Aun así, para fines prácticos la variación no es muy considerable y el objetivo de este análisis es conocer el comportamiento del viento en el sitio, enfocándose en la dirección y velocidad media del viento, así como la densidad de energía producida.

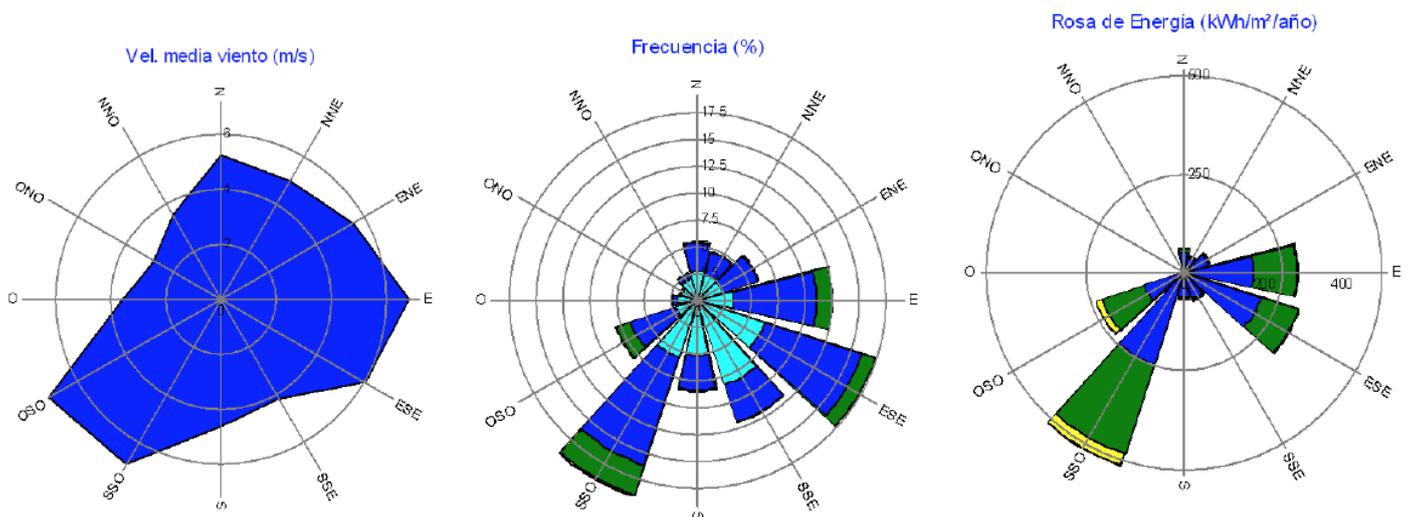


Figura 6: Velocidad media de viento, frecuencia y densidad de energía a 80 m a partir de la distribución Weibull (<5 m/s cyan, 5-10 m/s azul, 10-15 m/s verde, 15-20 m/s amarillo y >20 m/s rojo).

4.2. Análisis del arreglo cuadrado

Como ya se describió anteriormente, el arreglo inicial de aerogeneradores es un cuadrado de 200 m de lado con el centro en la ubicación de la estación de medición. En cada esquina de este cuadrado se colocó un aerogenerador, como se muestra en la figura 7. También se puede observar que alrededor de la estación de medición es en su mayoría zona de cultivos, con muy pocos edificios y algunos árboles aislados. Con este arreglo de turbinas eólicas se pueden producir hasta 15,547 MWh/año, sin embargo debido a las pérdidas por estela se tiene una eficiencia de granja del 88% con una producción de 13,686.3 MWh/año, o 3,079.4 MWh/año promedio por aerogenerador. Además, se calcularon un total de 1540 horas de carga completa lo que significa un FC de 17.6 %.



Figura 7: Vista aérea del sitio con el arreglo de aerogeneradores (rojo) y la estación de medición (naranja).

El aerogenerador ubicado en el cuarto cuadrante fue el menos afectado por las pérdidas inherentes al arreglo del parque con una eficiencia del 95.84 %. La principal causa de las pérdidas en este arreglo fue la proximidad entre los aerogeneradores, poco más de dos diámetros entre sí. Aunque las pérdidas también se deben a la geometría del arreglo en sí, debido a que no considera los sitios con mayor potencial ni los vientos preferentes al ser un arreglo regular.

4.3. Optimización del arreglo

La propuesta de optimización del arreglo en el sitio se basó en un mapa de recurso calculado a partir de la orografía, rugosidades, obstáculos y estadística de viento en la región. En la figura 8 se puede observar que los aerogeneradores se colocaron lo más separados posibles entre sí para evitar pérdidas por estela, pero también se colocaron en los espacios de la región con mayor densidad de potencia (zonas rojas y naranjas). La distribución de los aerogeneradores nueva procuró evitar las regiones que por sus características tienen un menor potencial de producción (zonas moradas y azules).

En la figura 9 se puede observar que con el arreglo cuadrado la generación con vientos del este se veía altamente afectada. También se puede observar cómo es que la nueva ubicación de los aerogeneradores influye en una disminución de las pérdidas por efectos de estela para todas las direcciones, lo que es indicador de que el nuevo arreglo tiene un mejor aprovechamiento del recurso.

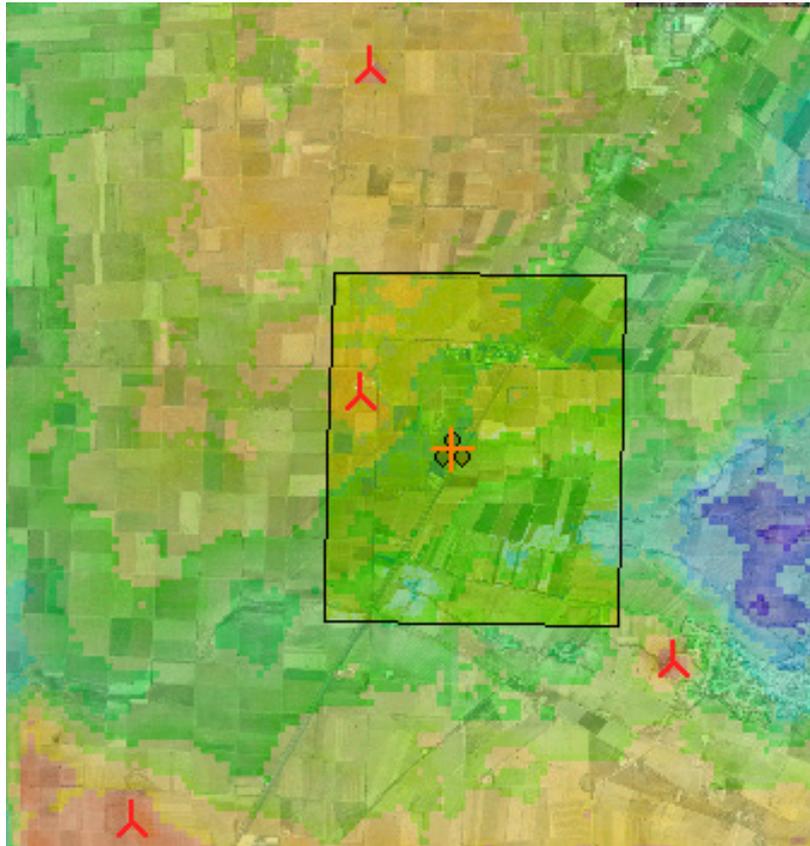


Figura 8: Vista aérea del sitio con el arreglo de aerogeneradores (rojo) optimizado y la estación de medición (naranja), sobre el mapa de recurso calculado.

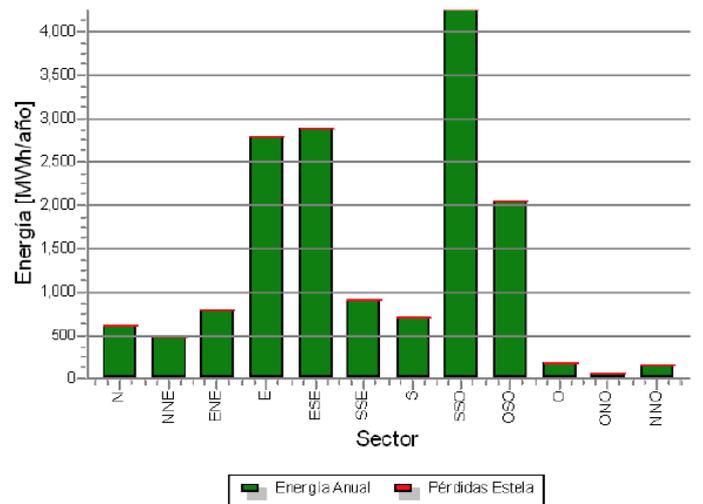
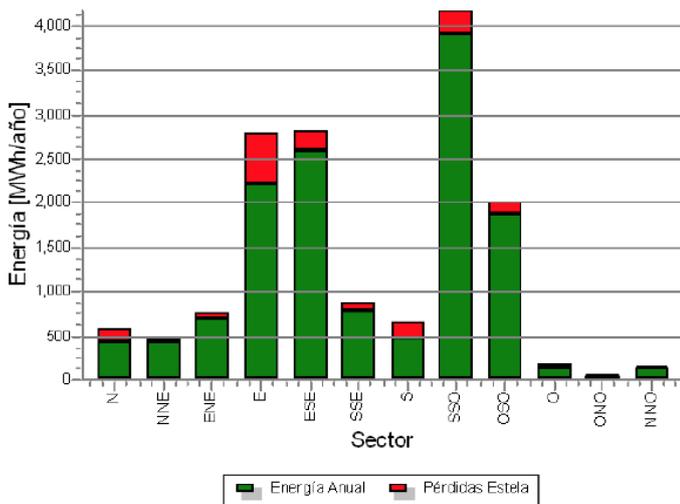


Figura 9: Pérdidas de energía anual por estela en cada dirección con el arreglo cuadrado (izquierda) y después de la optimización (derecha).

Para este nuevo arreglo se calculó un nuevo posible valor de producción de 15,902.9 MWh/año, valor mayor al otro arreglo ya que las turbinas eólicas se colocan en mejores posiciones, pero con una eficiencia de parque de 99.7% con lo que se producirían 15,862.8 MWh/año. Es decir, un promedio por aerogenerador de 3,569.1 MWh/año, el más alto en los cálculos realizados, así también un FC de 20.4% igualmente el más alto. Para todas las direcciones las pérdidas son muy pocas.

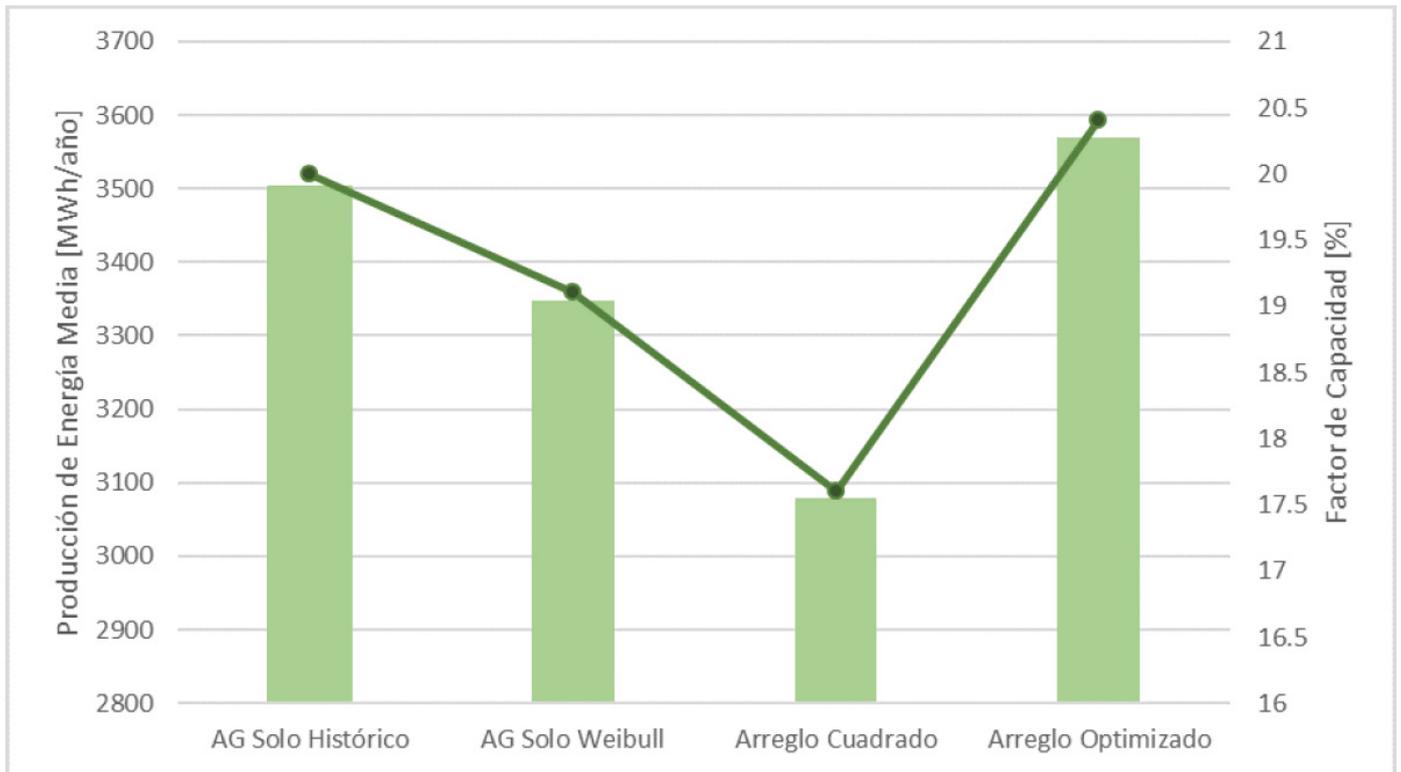


Figura 10: Producción anual y factor de capacidad para cada aerogenerador en cada caso.

El consumo medio de electricidad por hogar en México es de 2 MWh/año [12], por lo que la producción total del arreglo optimizado de 15.8 GWh/año sería suficiente para abastecer las necesidades de 7,900 hogares en la región. En la figura 10 y el cuadro 2 se puede ver que los mayores resultados de producción media y FC se tuvieron en el aerogenerador colocado en el sitio considerando el histórico de datos, así como en el arreglo optimizado que tiene una geometría irregular y se encuentra más disperso. En ambos casos el FC es muy similar, reflejando que la influencia de los aerogeneradores entre sí es prácticamente nula. Además, entre el arreglo cuadrado y el propuesto se logró aumentar en casi 3% el FC con lo que se logra aumentar considerablemente la producción.

A pesar de que el FC de la planta se incrementó a 20.4 %, ya que es muy similar al de un solo aerogenerador en el sitio difícilmente se podrá lograr que incremente únicamente con la reubicación, por lo que se deben proponer otras estrategias para aprovechar el recurso eólico en el sitio de una mejor manera.

Configuración	Densidad de Energía [kWh/m ²]	Producción media [MWh/año]	FC [%]
Aerogenerador solo (histórico)	1,555	3,503	20.0
Aerogenerador solo (Weibull)	1,368	3,347	19.1
Arreglo cuadrado	2,044	3,079	17.6
Arreglo optimizado	1,492	3,569	20.4

Cuadro 2: Comparativa de los cuatro cálculos de energía anual producida de los aerogeneradores individuales.

5. Conclusiones

Con la colocación de un arreglo de cuatro aerogeneradores en Cieneguillas, Zacatecas sería posible la producción de hasta 15.8 GWh/año suficiente para proveer electricidad a 7,900 hogares aproximadamente. En este arreglo óptimo, las pérdidas por estela llegan a representar el 1.68% de la posible producción. Sin embargo, en este arreglo óptimo de los cuatro aerogeneradores no se está considerando la disponibilidad del terreno ya que no se restringe a un área pequeña, lo cual sería un inconveniente al momento de hacer la compra de terrenos, así como la conexión del parque y su operación y mantenimiento. Por lo tanto se tendrán costos mayores, los cuales se podrán calcular en un análisis posterior.

En un arreglo más compacto, dentro de un terreno más pequeño, las pérdidas por estela se vuelven un factor importante. En el caso de nuestro primer arreglo, las pérdidas de este tipo disminuyeron en 11.97% el total de la producción posible. Por esta razón, realizar un estudio previo de la colocación de los aerogeneradores en un sitio es muy importante. Ya que la principal dirección del viento preferente en el sitio es la sursudoeste, considerar esto para la optimización de la producción de potencia fue de utilidad ya que se buscó evitar arreglos de aerogeneradores con dirección de efectos de estela paralelos a la dirección preferente. Tener una dirección preferente con una frecuencia alta implica que la máquina debe estar rotando menos para estar perpendicular al viento, lo que influye en un menor desgaste del equipo. Aunque el FC del parque se logró mejorar 3% hasta ser de 20.4% respecto al arreglo original, es posible

que otras estrategias funcionen mejor para incrementar la producción de energía en caso de poner una planta eólica en Cieneguillas. Una de ellas es utilizar otro modelo de aerogenerador diferente al Vestas V90-2MW ya que las velocidades en el sitio son bajas la mayoría del tiempo. Un posible equipo podría ser el Vestas V110-2MW que con su mayor diámetro de rotor tiene una velocidad de arranque y una nominal más bajas, con lo cual se incrementaría la producción.

Considerando que en Cieneguillas el FC será aproximadamente el 20.4%, se puede realizar un dimensionamiento en el sitio con un mayor número de aerogeneradores y revisar si esto resulta en un proyecto factible económicamente. La intención será conocer hasta qué punto es posible aprovechar el recurso eólico en el lugar, y conocer cuál sería la capacidad instalada máxima aproximada en el sitio.

6. Referencias

- [1] SENER, "Mapa de ruta tecnológica Energía Eólica," *Diario Oficial de la Federación*, p. 70, 2017.
- [2] IRENA and DTU, "Global atlas for renewable energy," 2015. Available at <https://irena.masdar.ac.ae/GIS/?map=103>.
- [3] L. B. Rodríguez, E. V. Arcos, L. A. M. Álvarez, J. S. R. Aguilar, M. A. R. Bueno, S. G. Álvarez, A. E. R. Salas, D. A. R. Ruíz, D. A. Esparza, E. N. Escobar, M. d. L. B. Razo, R. B. R. Salas, and F. C. González, "Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2017," *Diario Oficial de la Federación*, 2017.
- [4] SENER, "Prospectiva de Energías Renovables," *Diario Oficial de la Federación*, vol. 1, p. 156, 2015.
- [5] IRENA, "Wind energy," 2018. Available at <http://www.irena.org/wind>.
- [6] K. S. Murthy and O. P. Rahi, "A comprehensive review of wind resource assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. October 2016, pp. 1320-1342, 2017.
- [7] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*. Wiley, 2 ed., 2009.
- [8] N. O. Jensen, "A note on wind generator interaction," *Riso National Laboratory Roskilde*, pp. 1-16, 1983.
- [9] I. EMD, *WindPRO 2.7 User Guide 3*. EMD International A/S, 2010.
- [10] T. Sørensen, *Notes on WindPRO and Wind Energy*. EMD International A/S, 2004. Available at <http://people.plan.aau.dk/lund/Study/EM7/SESA/Wind>
- [11] D. J. Milborrow, "The performance of arrays of wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 5, no. 3-4, pp. 403-430, 1980.
- [12] IEA and IPEEC, "Building Energy Performance Metrics," *Building Science Digest*, vol. 4, no. 8, 2015.

EVALUACIÓN COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DEL TIPO CUASI FUENTE DE IMPEDANCIA (QZSI) PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Altamirano Roldán Fabián Said

CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada, AC

fabian.saidar@gmail.com

Saucedo Serrano Félix Eduardo

CIO, AC Centro de Investigaciones en Óptica

felixss@cio.mx

Silva Márquez Sergio Isaías

ITA, Instituto Tecnológico de Aguascalientes

sergiosilvamarquez@gmail.com

Martell Chávez Fernando

CIO, AC Centro de Investigaciones en Óptica

fmartell@cio.mx

Resumen: Ante la creciente utilización de la tecnología solar fotovoltaica para la generación de electricidad de uso residencial, es conveniente evaluar nuevas topologías de convertidores electrónicos de potencia, que pudieran presentar ventajas en la eficiencia u otros parámetros de desempeño. En este artículo se reporta el diseño, construcción y puesta en marcha de un convertidor CD/CA, de topología, “Cuasi Fuente de Impedancia (QZSI)”, la cual es capaz de invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia. En este trabajo de investigación, se confirma que para los rangos de potencia del micro-inversor, la topología QZSI proporciona la amplificación e inversión de voltaje de manera eficiente, y además se compara el funcionamiento del prototipo utilizando dispositivos de potencia como MOSFET e IGBT. Se realiza una evaluación técnica comparativa de parámetros de entrada y salida como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, para ambos dispositivos MOSFET e IGBT en el prototipo experimental. El aná-

lisis de los resultados indica que es más conveniente la selección de MOSFET dada la variación natural de la radiación solar a lo largo del día, sobre todo en horas de baja radiación solar, ya que usando estos dispositivos en la topología QZSI, se obtiene un mejor desempeño en eficiencia, principalmente en bajos niveles de potencia.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, Inversor QZSI, Micro inversores.

1. Introducción

A nivel mundial, más de 1000 millones de personas viven sin electricidad, y otros 3000 millones utilizan combustibles contaminantes como leña u otra biomasa para cocinar o proveer calefacción sus viviendas” [1]. Por otro lado el crecimiento de la población ha incrementado el requerimiento energético global, generando una fuerte competencia por suplirla, a través de soluciones rápidas y económicas, lo que ha llevado a utilizar inconscientemente combustibles fósiles de forma no apropiada, lo que genera contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados con impactos generalizados en la salud y medio ambiente [2]. En la actualidad es necesario hacer frente a esta problemática y al cambio climático [3], por lo tanto se plantea la energía solar fotovoltaica como una alternativa sustentable para la generación de energía eléctrica, considerando los avances tecnológicos y el estudio de algunos de sus elementos esenciales como paneles fotovoltaicos o convertidores de corriente directa a corriente alterna (CD/CA).

La energía fotovoltaica se ha convertido en una fuente de energía renovable prometedora, dado que los costos para adquirir paneles fotovoltaicos, se han vuelto más accesibles para este nicho de mercado, y a que los avances tecnológicos han logrado mejorar su desempeño, su peso estructural y flexibilidad. Sin embargo la variabilidad de la entrega de voltaje de una celda fotovoltaica sigue siendo un reto debido a la temperatura y la irradiación solar [4], sin embargo los convertidores tradicionales fuente de voltaje (VSI), no son capaces manejar de forma eficiente la conversión de la energía por lo que más componentes deben ser utilizados para reducir las pérdidas, lo cual convierte a esta topología poco factibles por costos elevados de implementación [5].

De manera particular en este trabajo, se evalúa al convertidor de potencia, como uno de los elementos principales del sistema fotovoltaico, por lo tanto en este artículo se pretende generar conocimiento a través de la evaluación comparativa experimental de un convertidor de potencia del tipo cuasi fuente de impedancia QZSI (Figura 1), diseñado para la captación de energía solar fotovoltaica [6].

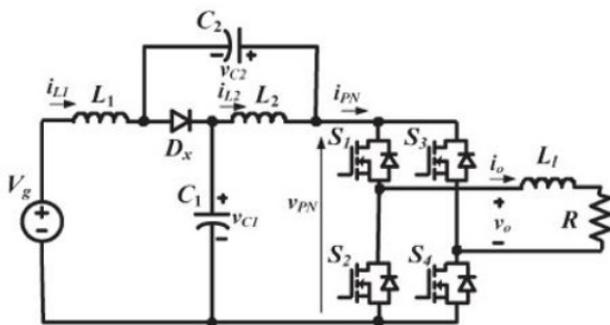


Figura 1: Diagrama del convertidor QZSI [7].

Este proyecto consiste en diseñar y construir un convertidor de potencia de topología QZSI, para la conversión de energía solar fotovoltaica, con el propósito de evaluar su funcionamiento utilizando MOSFET e IGBT como dispositivos electrónicos de potencia. Se realiza una evaluación técnica comparativa de parámetros de entrada y salida como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, para ambos dispositivos, con la finalidad de validar el diseño del QZSI y seleccionar con cuales componentes se logra un mejor desempeño.

La investigación realizada, describe los objetivos, diseño metodológico y las consideraciones requeridas para la evaluación de los parámetros de funcionamiento, que distinguen a un Inversor de Potencia del tipo Cuasi Fuente de Impedancia QZSI [8]. El objetivo es evaluar la relación entrada – salida en el prototipo en términos de eficiencia y de esta forma evaluar las pérdidas de energía tanto estáticas como dinámicas. La evaluación tiene lugar realizando pruebas y análisis a un prototipo QZSI diseñado para aplicaciones fotovoltaicas, como fuente de energía renovable. Este análisis resulta relevante debido a las pérdidas en la conversión energética por la conmutación y la interacción de sus elementos pasivos que integran al convertidor. Las restricciones en la calidad de la señal de salida de estos convertidores afectan su rendimiento por lo que se ve reducida la confianza de los usuarios y la proliferación de los sistemas fotovoltaicos como fuente de energía.

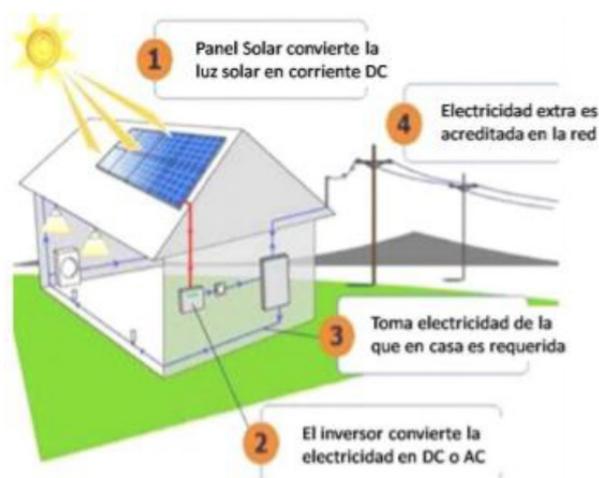


Figura 2: Elementos de un sistema Solar Fotovoltaico [2]

2. Métodos

Inversor de potencia del tipo Cuasi fuente de impedancia (QZSI)

El inversor QZSI es una topología derivada del inversor fuente de impedancia (ZSI), el cual conserva todas las ventajas del ZSI, el cual es capaz de invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia de

manera confiable. Por otro su desempeño es muy flexible ya que cuenta con un amplio rango de ganancia de voltaje, lo cual resulta más conveniente para aplicaciones fotovoltaicas, ya que la captación solar que realizan los paneles solares, varía dependiendo de la temperatura y la irradiación solar [5].

La ventaja principal de la topología ZSI es que elimina la conversión CD/CD de entrada, utilizando una red de impedancia integrando elementos pasivos para unir la fuente de alimentación, con el circuito principal de conmutación, permitiendo controlar el voltaje de entrada CD y salida CA, con los interruptores del puente inversor. [8]. Por otro lado el QZSI permite almacenar energía a través del acoplamiento de un banco de baterías, y en una sola etapa es capaz de amplificar e invertir la energía por lo que requiere para su construcción, menos elementos, asimismo ofrece mejor inmunidad a los ruidos en comparación a otras topologías [9]

De manera representativa en la figura 3, podemos observar las diferencias entre las topologías ZSI y un QZSI.

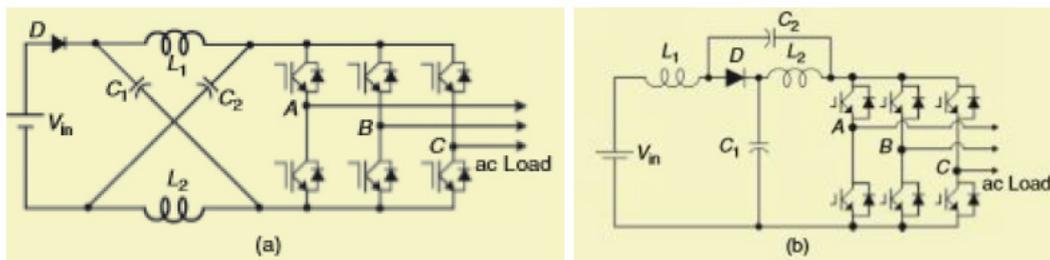


Figura 3: (a) Topología de un ZSI, (b) Topología de un QZSI [7].

Se define una metodología de diseño electrónico por etapas de acuerdo a los circuitos requeridos: a). Potencia, b). Interface y c). Control. Esta metodología esta soportada en la simulación, lo cual permite validar y verificar los circuitos electrónicos, cada uno de ellos de manera modular y posteriormente al ser integrados en el prototipo.

Diseño de circuito de potencia e interface para el convertidor QZSI

Para el circuito de potencia se seleccionan componentes adecuados como los dispositivos de potencia, diodos de alta velocidad, capacitores, inductancias, etc., para un nivel de potencia de 150 Watts. Para la implementación del circuito de control se especifica un micro-controlador Arduino Mega 2560.

El circuito de disparos es diseñado para un nivel de tensión de entre 8-10 Volts en la compuerta del transistor MOSFET/IGBT para lograr una conmutación de alta velocidad. En el diseño inicial se encontró la dificultad de tener un aislamiento entre el Arduino y el circuito del inversor, sin embargo el problema se soluciona armando un circuito con optoacopladores 4n25, resistencias, transistores 2n222 para amplificar la corriente del Arduino y de esta forma encender de manera correcta el led del optoacoplador.

En primera instancia se diseña un circuito con conductores IR2112, sin embargo este circuito se dañaba, por lo tanto fue necesario aislar el Arduino y el inversor. Por otro lado para lograr la opto-aislación, es necesario instalar tres fuentes para la activación de los transistores, estas fuentes fueron las B0512-2W de MORNSUN, éstas son conmutables y aisladas que elevan la tensión de 5V a 12 con 2W de disipación, se puede observar que en el esquemático de tuvo una configuración “pull down” en la salida del optoacoplador y de igual manera en la entrada del optoacoplador con el transistor 2n2222.

Además, se añadió una compuerta lógica 74LS32 para sumar la señal de conmutación con la señal de estado “shoot-through” para que el transistor MOSFET/IGBT tuviera la señal “completa” ya que, el Arduino nos brinda la señal de conmutación y la señal de los estados “shoot-through” por separado, por ello se decidió utilizar esa compuerta, para tener una sola señal.

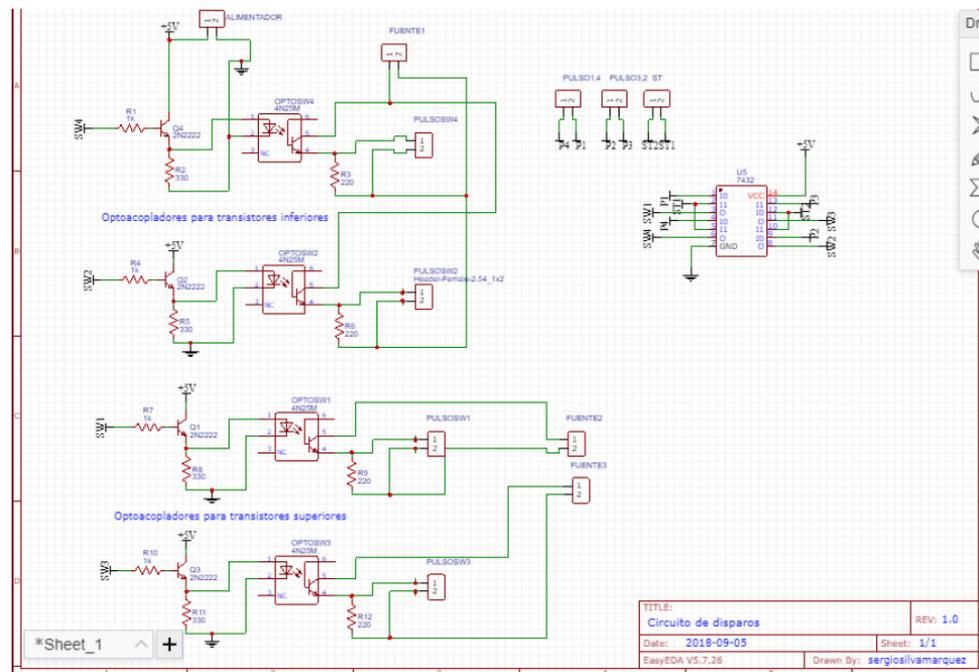


Figura 4: Circuito de disparos para prototipo.

Algoritmo de control del convertidor QZSI

Una de las técnicas de modulación más empleadas en esta topología, es la de Modulación de Ancho de Pulso (PWM). El patrón de conmutación se obtiene a partir de la comparación triangular de frecuencia y amplitud fija, la cual se genera al comparar dos señales: una moduladora, V_{ref} y la portadora, V_p que es a alta frecuencia. Mediante la comparación de las dos señales anteriores es posible generar los pulsos que comandarán a los dispositivos semiconductores de potencia.

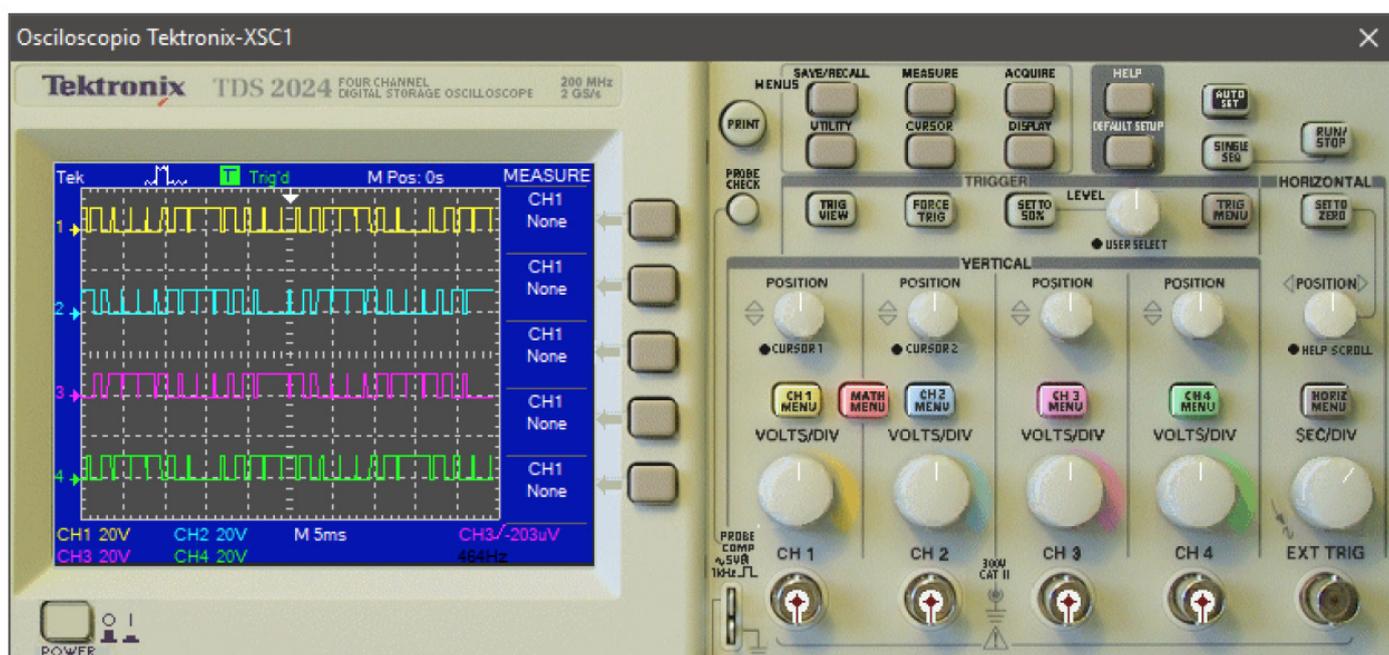


Figura 5: Patrón de pulsos.

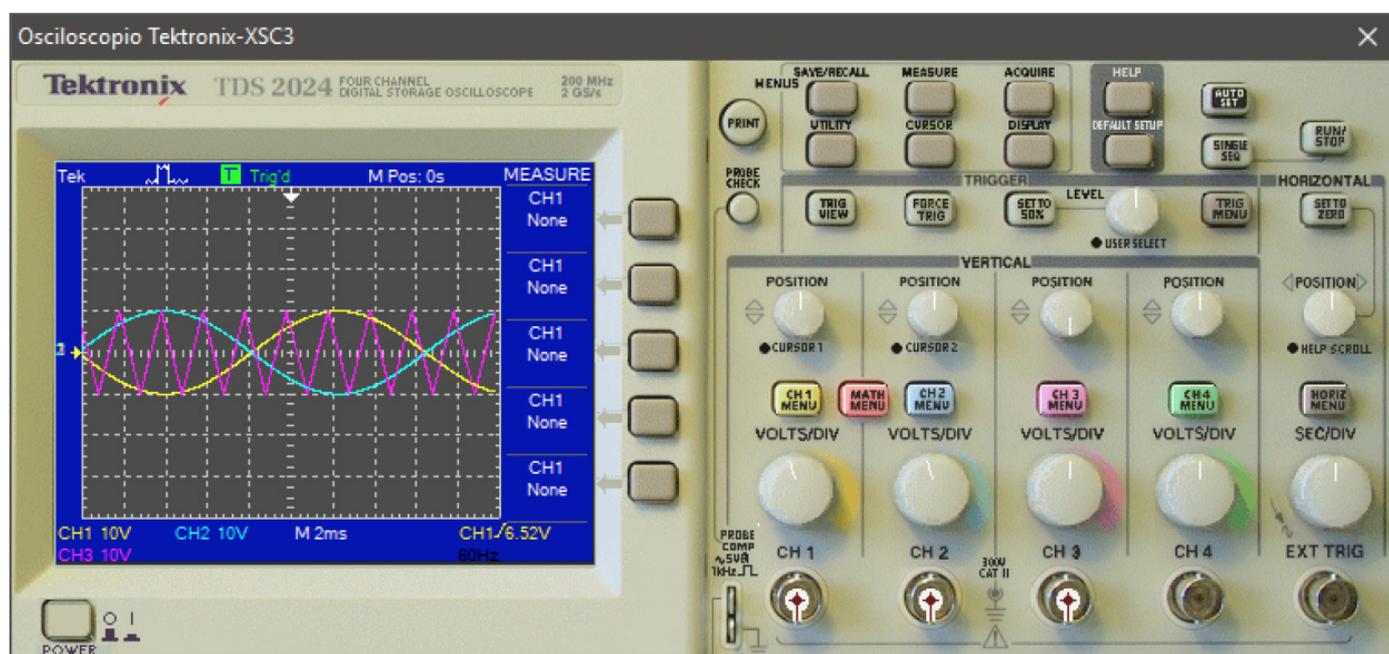


Figura 6: Comparación de señales.

Cada transistor de potencia debe de tener su propio patrón de activación, tener en cuenta el arreglo de la figura 7.

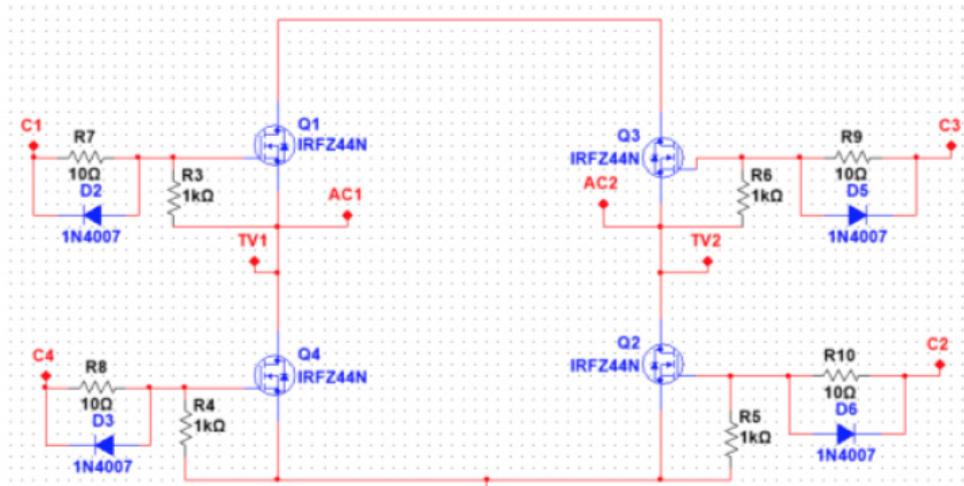


Figura 7: Puentes H.

En el “QZSI” el voltaje es controlado mediante la regulación del índice de modulación, así como con el ciclo de trabajo del estado “shoot-through”, en el cual se generan cortos circuitos en las piernas del inversor para poder elevar el voltaje del enlace de corriente directa.

La Modulación de Ancho de Pulso Simple (SPWM) permite agregar los estados “shoot-through” y así amplificar el voltaje. Esta técnica al igual que el PWM requiere de una señal portadora y una moduladora la cual se encarga de invertir el voltaje. Sin embargo, el estado “shoot-through” es comandado por una señal de CD U_{st} . En la figura 6 se muestra el esquema de conmutación del algoritmo SPWM implementado.

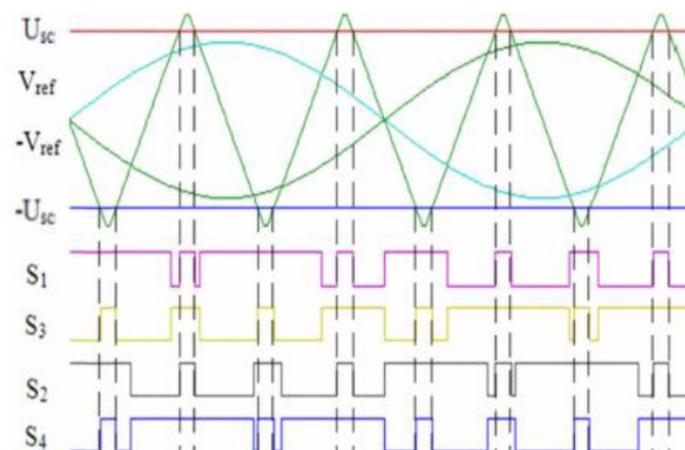


Figura 8. Esquema de la técnica SPWM [11].

La técnica SPWM se implementó en el circuito de la figura 7 en el software PSIM.

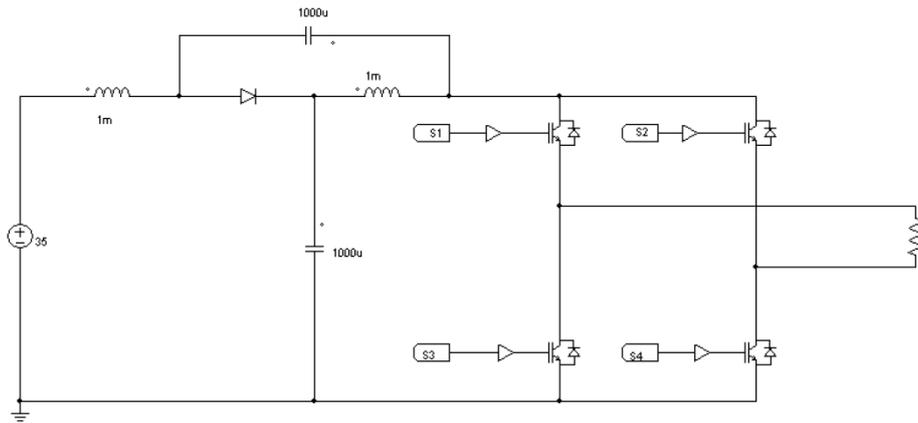


Figura 9. Circuito del QZSI simulado en el software PSIM.

La técnica SPWM se describe a continuación:

- Estado de modulación

- Rama n°1:

Si $v_{ref} > v_p$ entonces S_1 está encendido

Si $v_{ref} < v_p$ entonces S_3 está encendido

- Rama n°2

Si $-v_{ref} > v_p$ entonces S_2 está encendido

Si $-v_{ref} < v_p$ entonces S_4 está encendido

- Estado shoot-through

Si $u_{st} < v_p$ entonces S_1, S_2, S_3, S_4 están encendidos

Si $-u_{st} > v_p$ entonces S_1, S_2, S_3, S_4 están encendidos

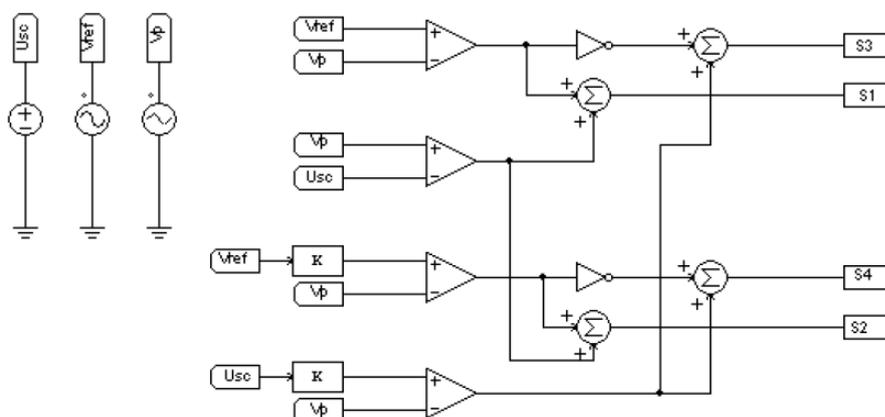
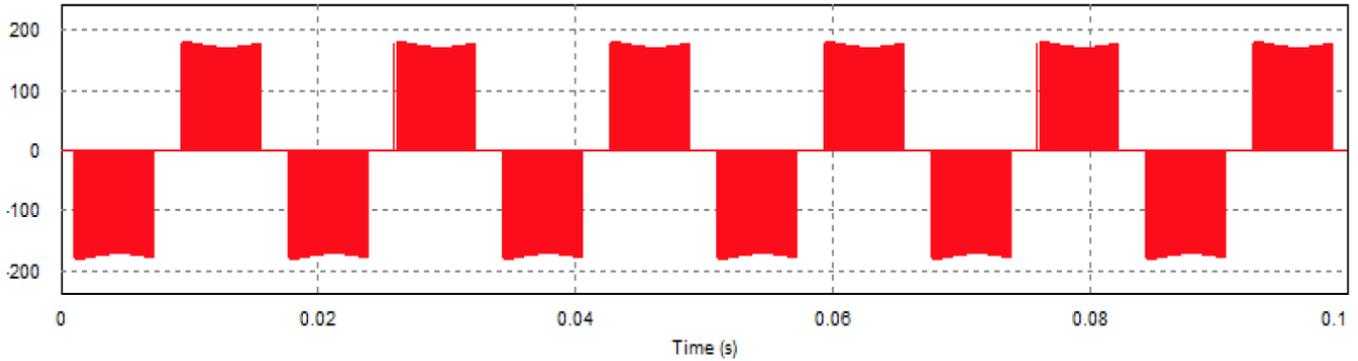


Figura 10. Implementación del SPWM en PSIM.

Se simula en el software PSIM, el voltaje de salida para el QZSI y la técnica SPWM. En la gráfica de la figura 9, es posible apreciar la amplificación de voltaje.



Gráfica 1. Voltaje de salida en el QZSI.

Por medio de la simulación se verifica el funcionamiento del QZSI, así como la técnica SPWM. Con ello es posible observar la sensibilidad del estado “shoot-through” ante pequeñas variaciones, reflejando la no linealidad de la técnica SPWM. Por lo anterior es recomendable el estudio y la caracterización de esta técnica para distintos valores de capacitores e inductancias, esto con el fin de poder conocer mejor el comportamiento de esas variaciones.

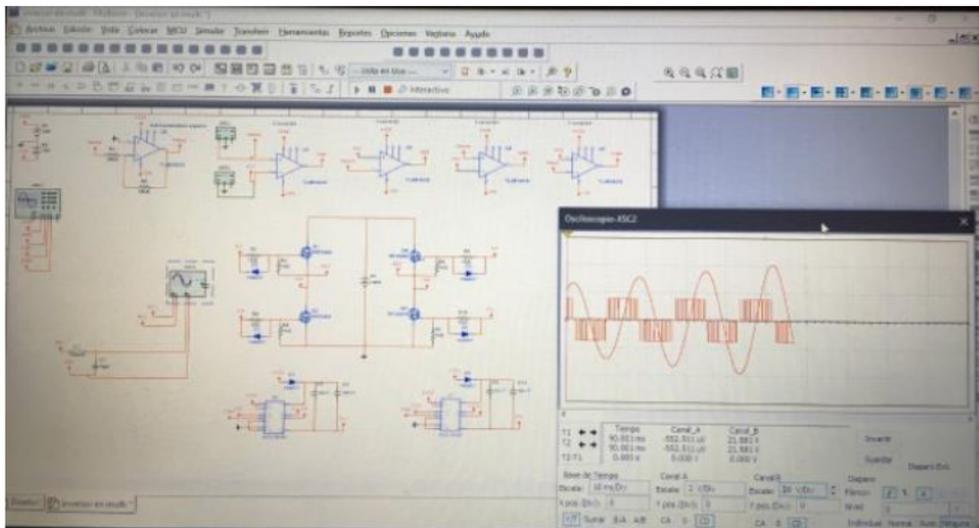


Figura 11. Simulación.

3. Resultados

Desarrollo de las pruebas

Las pruebas se desarrollaron utilizando una fuente poder de corriente directa y una lámpara incandescente de 60 Watts como carga. Se aplicaron voltajes de alimentación fijos (5, 10, 15, 20, 25 y 30 V) y con el índice de amplificación (B) variable desde 5% hasta 60%. Se tomaron mediciones de voltaje a la entrada (V_{in}), corriente a la entrada (I_{in}), voltaje a la salida rms, (V_{out}), corriente a la salida rms (I_{out}), con estas mediciones se calculan las potencias de entrada y de salida, así como la eficiencia (*Tabla 1 para 5 Volts, mínima tensión en las pruebas y 30 Volts en tabla 2 como máximo*). Se considera una frecuencia de 30kHz ya que durante las primeras aplicaciones, la eficiencia es mayor. Por otro lado se tiene la ventaja de que a esa frecuencia el oído humano no es capaz de percibirla, es decir, se vuelve silencioso, por ello se selecciona para el desarrollo de las pruebas.

f (kHz)	V_{in}	B %	I_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{in}	P_{out}	eficiencia
30	5	5	0.06	2.14	0.09	0.3	0.1926	64.20%
	5	10	0.07	2.214	0.093	0.35	0.205902	58.83%
	5	15	0.08	2.35	0.096	0.4	0.2256	56.40%
	5	20	0.09	2.51	0.099	0.45	0.24849	55.22%
	5	25	0.1	2.65	0.101	0.5	0.26765	53.53%
	5	30	0.11	2.72	0.104	0.55	0.28288	51.43%
	5	35	0.12	2.87	0.108	0.6	0.30996	51.66%
	5	40	0.13	3.12	0.111	0.65	0.34632	53.28%
	5	45	0.15	3.25	0.114	0.75	0.3705	49.40%
	5	50	0.18	3.53	0.119	0.9	0.42007	46.67%
	5	55	0.21	3.8	0.123	1.05	0.4674	44.51%
	5	60	0.25	4.05	0.128	1.25	0.5184	41.47%

f (kHz)	V_{in}	B%	I_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{in}	P_{out}	eficiencia
30	5	0	0.103	3.57	0.121	0.515	0.43197	83.88%
	5	5	0.116	3.87	0.125	0.58	0.48375	83.41%
	5	10	0.126	4.08	0.128	0.63	0.51988	82.49%
	5	15	0.136	4.27	0.13	0.68	0.5551	81.63%
	5	20	0.148	4.53	0.133	0.74	0.60249	81.42%
	5	25	0.161	4.78	0.136	0.805	0.65008	80.76%
	5	30	0.179	5.12	0.139	0.895	0.71158	79.52%
	5	35	0.197	5.45	0.142	0.985	0.77532	78.71%
	5	40	0.219	5.85	0.146	1.095	0.85556	78.13%
	5	45	0.251	6.42	0.151	1.255	0.96942	77.24%
	5	50	0.285	6.94	0.156	1.425	1.08264	75.97%
	5	55	0.344	7.71	0.163	1.72	1.25673	73.07%
5	60	0.418	8.65	0.169	2.09	1.46354	70.03%	

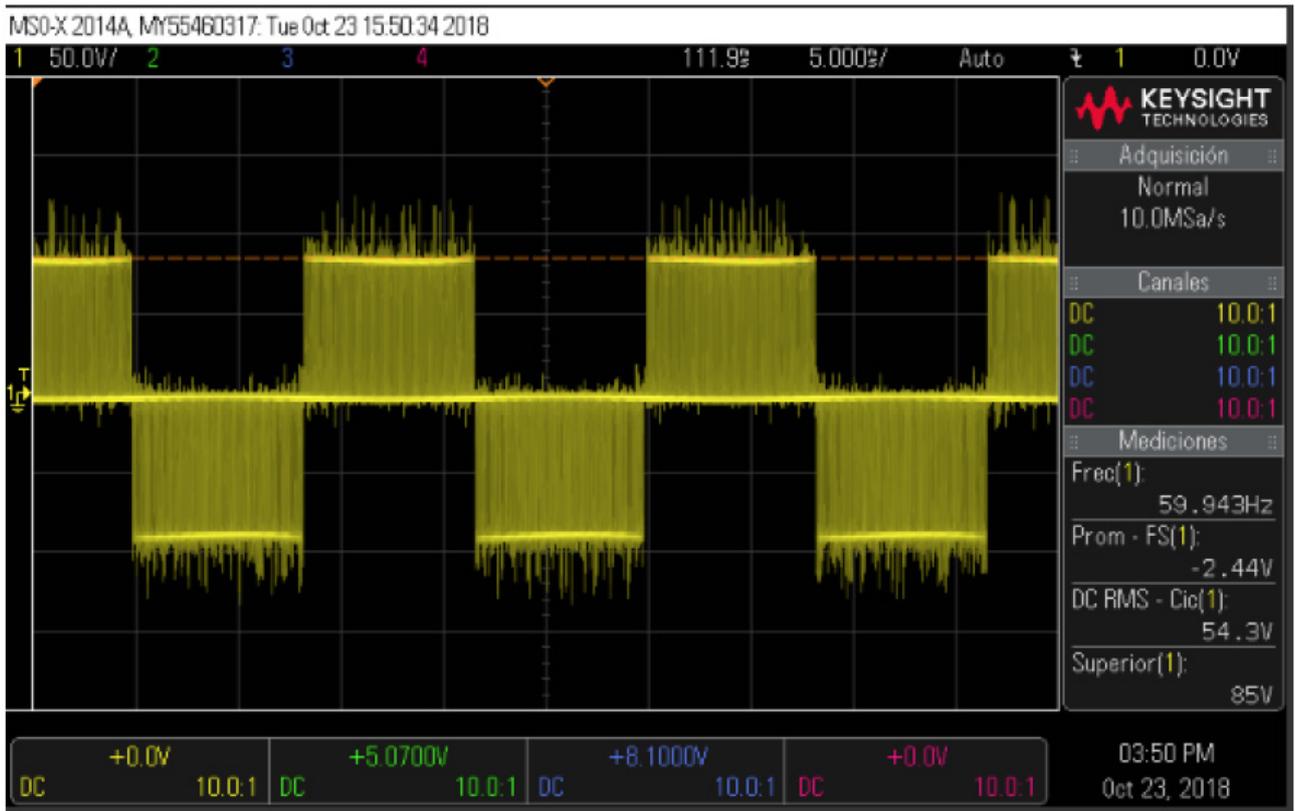
Tabla 1: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 5 volts para: a).IGBT y b).MOSFET.

f (kHz)	V_{in}	B %	I_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{in}	P_{out}	eficiencia
30	30	5	0.18	21.2	0.254	5.4	5.3848	99.72%
	30	10	0.21	22.89	0.269	6.3	6.15741	97.74%
	30	15	0.23	24.34	0.279	6.9	6.79086	98.42%
	30	20	0.26	25.89	0.29	7.8	7.5081	96.26%
	30	25	0.28	27.4	0.301	8.4	8.2474	98.18%
	30	30	0.32	29.4	0.317	9.6	9.3198	97.08%
	30	35	0.36	31.4	0.331	10.8	10.3934	96.24%
	30	40	0.41	33.9	0.35	12.3	11.865	96.46%
	30	45	0.48	36.9	0.371	14.4	13.6899	95.07%
	30	50	0.58	40.8	0.396	17.4	16.1568	92.86%
	30	55	0.74	45.5	0.426	22.2	19.383	87.31%
	30	60	1.01	50	0.463	30.3	23.15	76.40%

f (kHz)	V_{in}	B%	I_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{in}	P_{out}	eficiencia
30	30	0	0.216	24.35	0.263	6.48	6.40405	98.83%
	30	5	0.25	26.6	0.281	7.5	7.4746	99.66%
	30	10	0.275	28.1	0.29	8.25	8.149	98.78%
	30	15	0.3	29.75	0.299	9	8.89525	98.84%
	30	20	0.333	31.6	0.311	9.99	9.8276	98.37%
	30	25	0.37	33.8	0.325	11.1	10.985	98.96%
	30	30	0.41	35.9	0.339	12.3	12.1701	98.94%
	30	35	0.465	38.55	0.356	13.95	13.7238	98.38%
	30	40	0.54	42.19	0.377	16.2	15.90563	98.18%
	30	45	0.63	46.1	0.398	18.9	18.3478	97.08%
	30	50	0.735	50.3	0.419	22.05	21.0757	95.58%
	30	55	0.92	56.8	0.453	27.6	25.7304	93.23%
30	60	1.14	63.6	0.486	34.2	30.9096	90.38%	

Tabla 2: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 30 volts para: a).IGBT y b).MOSFET.

Se logra comprobar que el algoritmo PWM simple, se implementa de manera correcta, asimismo el funcionamiento de la red de impedancia y el circuito de disparos. Conforme a los resultados de cálculo de ambas pruebas, los MOSFET dieron mejores resultados y la eficiencia crece cuando el voltaje de alimentación es mayor. En la gráfica 8 se aprecia la forma de onda del voltaje de salida en el prototipo, la cual representa el resultado de la integración total del proyecto. Por otro lado en la figura 12 se visualiza el prototipo armado en sus 3 etapas (*Potencia, interface y control*), trabajando de tal forma que es posible encender un foco de 60 Watts.



Gráfica 8. Forma de onda del voltaje de salida.

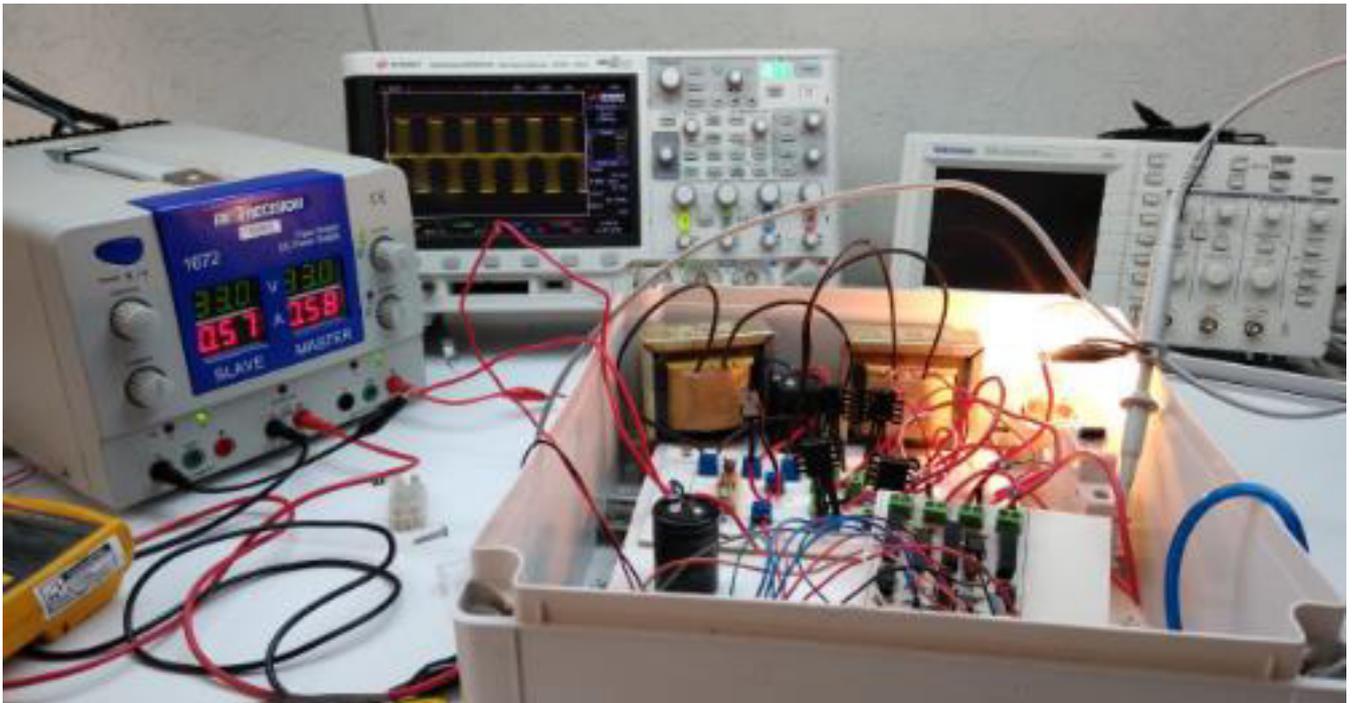
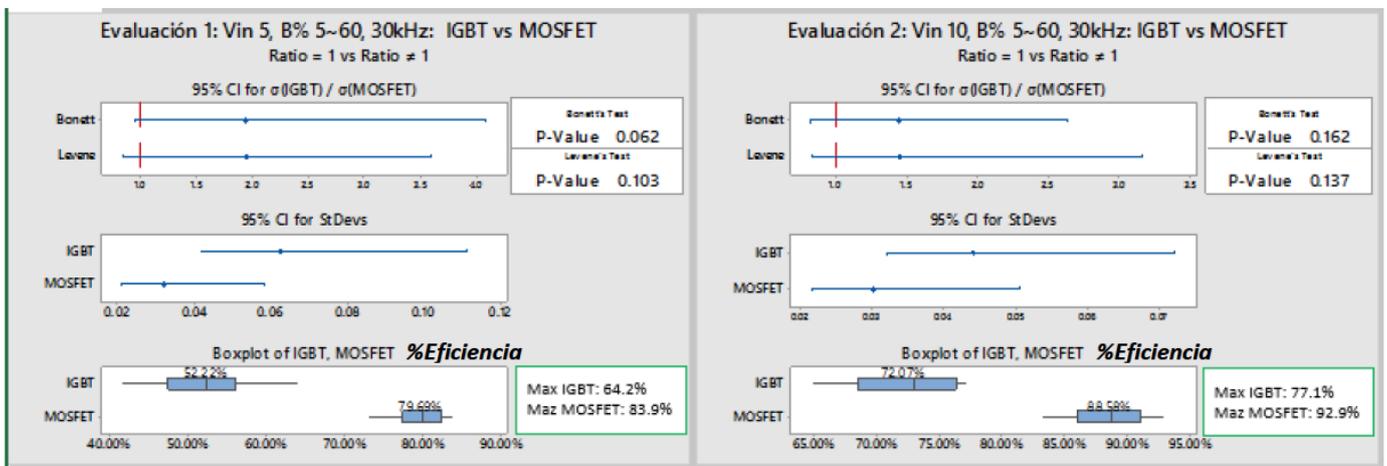
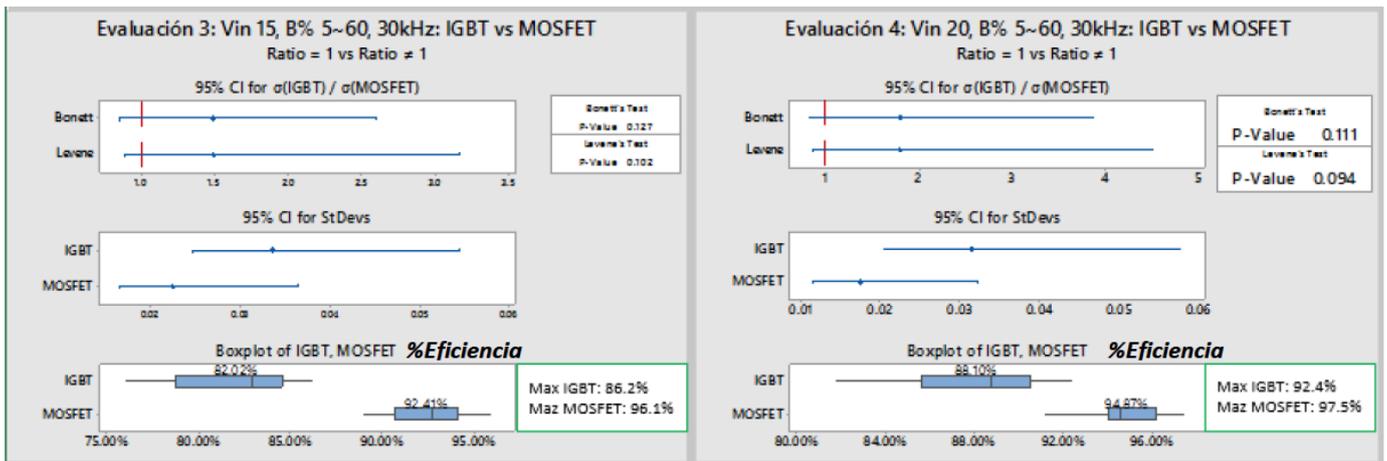


Figura 12. Prototipo de convertidor QZSI con foco 60 W.

Las pruebas revelan que cuanto menor es la tensión, el MOSFET presenta mayor eficiencia sobre el IGBT. Por otro lado cuanto mayor es la tensión de alimentación, la eficiencia del inversor va en aumento en ambos dispositivos, sin embargo al aumentar el índice de amplificación B, se degrada la eficiencia. Los datos colectados se procesaron en Minitab, donde fue posible realizar una evaluación estadística. Se aprecia en la gráfica 2-3 que el MOSFET alcanza una eficiencia promedio de 79.69%, presentando un mejor desempeño en comparación con el IGBT con 52.22%. Es en este nivel de potencia en donde el desempeño del MOSFET es más relevante sobre el IGBT.

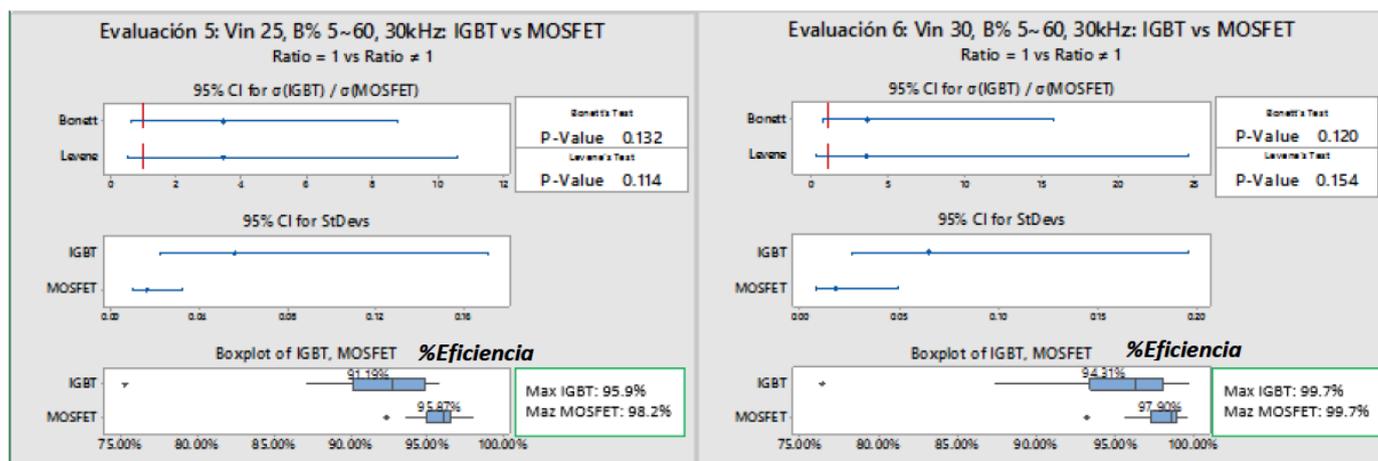


Gráfica 2-3: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IBT con 5 y 10 V



Gráfica 4-5: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IBT con 15 y 20 V

Finalmente en la gráfica 6-7 es posible apreciar el punto máximo de eficiencia de las pruebas realizadas en el prototipo para ambos dispositivos, con una tensión de 30 volts, el MOSFET alcanza una eficiencia promedio de 97.9%, en comparación con el IGBT con 94.31%.



Gráfica 6-7: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IBT con 25 y 30 V

4. Conclusiones

Al realizar este trabajo se logró comprobar que el QZSI es una topología que brinda buenos resultados de amplificación e inversión de voltaje en una sola etapa y con un valor aceptable de eficiencia. Asimismo, se concluye que el MOSFET es el dispositivo más apropiado para ser utilizado en bajas potencias, en la topología. En el presente trabajo se logra desarrollar experiencia en el diseño e integración de convertidores electrónicos de potencia, utilizando una metodología soportada en la simulación PSIM.

La contribución es haber concretado un buen circuito de disparos y haber verificado la ventaja de los MOSFET's sobre IGBT's, para el rango de potencia variable en la que debe operar el inversor para esta aplicación de conversión de energía en paneles fotovoltaicos.

También se logra conformar un grupo de trabajo de alumnos de posgrado y pregrado del Instituto Tecnológico de Aguascalientes, CIATEQ y soporte del Centro de Investigaciones en Óptica.

Finalmente como trabajo futuro se trabajará en la interconexión a la red eléctrica y en realizar pruebas con paneles fotovoltaicos.

En este contexto, se pretende para futuras pruebas implementar en el código de control el sistema MPPT mencionado en "MPPT Techniques for PV Systems, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013" para su implementación en paneles fotovoltaicos, de igual manera, se piensa en usar otros métodos de conmutación y determinar con cual método tiene mayor eficiencia.

5. Agradecimientos

Agradecemos al CONACYT y a los centros públicos de investigación CIATEQ y CIO por proveer los espacios y equipos para la realización de este proyecto. A la empresa Ingeniería Mecatrónica, SA de CV, por proveer componentes electrónicos y materiales para el prototipo. Agradecemos a los estudiantes de del Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Miguel Ángel Salazar Pinto y Julio Humberto Rosales Sandoval por su valiosa colaboración en la investigación preliminar y diseño del circuito.

6. Referencias

- [1] Mundial, Banco, «Energía,» Cinco Instituciones, Un Grupo, 03 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>. [Último acceso: 2018].
- [2] B. J. - F. Ricardo, «Energía solar fotovoltaica, una alternativa para el futuro,» de Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2018.
- [3] B. C. y J. Shenk, Dirección, Una verdad muy incómoda: Ahora o nunca. [Película]. Estados Unidos: Jeff Skoll, Richard Berge, Diane Weyermann, 2017.
- [4] A. R. F. - M. C. F. - S. C. Irma, «Generación fotovoltaica con adición de seguimiento cenital en el centro de México,» de Pistas Educativas, No. 125, octubre 2017, México, Tecnológico Nacional de México, Celaya, Gto., 2017.
- [5] Y. L. - J. A. - F. Z. P. - D. Liu, «Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems,» 1. Dept. of Electrical Engineering, Wuhan University, Hubei 430072, China, 2. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA, 2009.
- [6] M. S. - A. S. L. - A. F. - A. Y. V. - M. Mohammadian, «Quasi Z-source Inverter for Photovoltaic System Connected to Single Phase AC Grid,» de 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference, Tehran, Iran, 2010.
- [7] - Y. L. - S. M.K. Nguyen, «A comparison between single phase quasi-z-source and quasi-switched boost inverters,» de IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No.10. Pp. 6336-6344, 2015.
- [8] O. E. - H. Abu-Rub, «Z-Source Inverter, Topology Improvements Review,» 6 IEEE Industrial Electronics magazine, pp. 9-10, 2016.
- [9] X.P. Fang - X. G. Wang - Z.Q. Chen, «A Single phase ac power supply based on modified quasi z-source inverter,» de IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, no.5, 2014.
- [10] P. S. J. C. Coronel Zamora César Ivan, «Comparación de topologías QZSI de generación fotovoltaica residencial,» de Universidad Politecnica Salesiana, Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [11] M. Shahparasti, A. Sadeghi Larijani, A. Fatemi, A. Yazdian Varjani y M. Mohammadian, «Quasi Z - source Inverter for Photovoltaic System Connected to Single Phase AC Grid,» 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference, pp. 456-460, 2010.
- [12] J. C. V. d. K. - S. R. Morales, Fuentes de Energía Renovables y No Renovables, México: Alfaomega, 2014.
- [13] S. Krishnamurthy, «Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos,» de The Open University, UK, Milton Keynes, Inglaterra.

ACOPLAMIENTO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉCTRICOS A UN PROTOTIPO DE DESORBEDOR/CONDENSADOR DE MEMBRANA SEMIPERMEABLE HIDRÓFOBA

Sandra Daniela Nanco Mejía^a, Jonathan Ibarra Bahena^b, Ulises Dehesa Carrasco^c, Wilfrido Rivera Gómez Franco^b, Rosenberg J. Romero Domínguez^d.

^a Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad, No. 1001, Col. Chamilpa, CP 62209, Cuernavaca, Morelos, México. me_sany@hotmail.com

^b Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Col. Azteca, CP 62580, Temixco, Morelos, México

^c Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, CP 62550, Jiutepec, Morelos, México

^d Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad, No. 1001, Col. Chamilpa, CP 62209, Cuernavaca, Morelos, México.

Resumen: En este trabajo se acoplaron dispositivos termoelectricos (celdas Peltier) a un prototipo de desorbedor/condensador que utiliza el proceso de destilación por membrana porosa hidrófoba con espaciado de aire. Los dispositivos termoelectricos funcionaron como sistema de enfriamiento para generar el efecto de condensación. Se realizaron pruebas experimentales para evaluar la velocidad de desorción a diferentes temperaturas de la solución de LiBr. A partir de los resultados experimentales, se demuestra que la incorporación de dispositivos termoelectricos es factible como sistema de enfriamiento en la zona de condensación de un desorbedor/condensador de membrana porosa hidrófoba y puede sustituir un sistema convencional con fluidos lo que podría generar nuevos diseños de sistemas de aire acondicionado por absorción en zonas geográficas con abundante recurso solar.

Palabras clave: Celda Peltier, membrana porosa hidrófoba, separación por absorción, energía fotovoltaica.

1. Introducción

Un sistema de aire acondicionado por absorción se conforma de al menos cuatro elementos: Generador o desorbedor, condensador, evaporador y absorbedor. Donde el desorbedor (también llamado “generador”) es uno de los componentes principales y su función es la de separar el fluido refrigerante de la mezcla de trabajo. Los desorbedores convencionales requieren un flujo constante de energía térmica para alcanzar el punto de ebullición de la mezcla de trabajo y separar el fluido refrigerante en fase vapor.

Además, en sistemas que utilizan agua como fluido refrigerante requieren de una bomba de vacío para disminuir la presión de operación y por lo tanto disminuir el punto de ebullición. Entonces una alternativa a la desorción convencional por ebullición es la destilación por membrana (MD) que involucra la transferencia de calor y masa simultánea a través de los poros de una membrana semipermeable para separar los componentes generalmente volátil y no volátil de una solución, utilizando energía térmica para vaporizar moléculas volátiles presentes en la corriente de alimentación para la separación de vapor de agua de una solución salina acuosa (LiBr) a temperaturas menores que su punto de ebullición, trabajando a presión atmosférica. Una de las configuraciones de MD de especial interés para el desarrollo de nuevos desorbedores, es la destilación por membrana con espaciado de aire (AGMD por las siglas en inglés de Air Gap Membrane Distillation) que además de formarse por un canal de alta temperatura y la membrana porosa e hidrófoba, tiene un espacio de aire que atraviesa el vapor hacia la placa de condensación.

La fuerza impulsora de la difusión del vapor de agua a través de los poros de la membrana es la diferencia de presión parcial causada por la diferencia de temperatura entre los dos lados de la membrana [1], para esto la mezcla de trabajo (LiBr) debe estar a alta temperatura relativa y la placa de refrigeración a baja temperatura relativa [2] como se observa en la Figura 1.

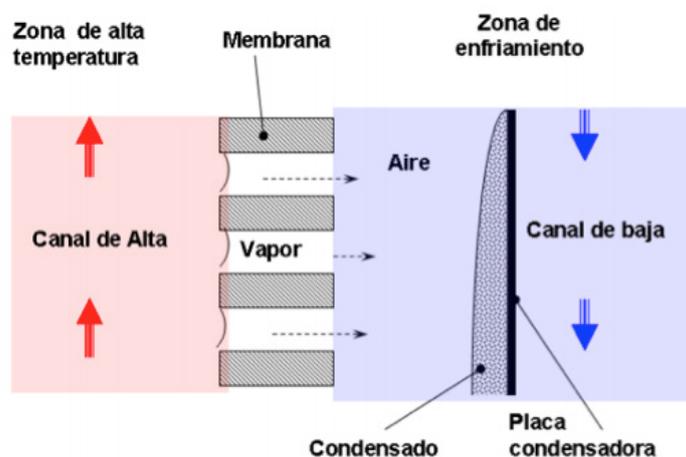


Figura 1. Destilación por membrana con espaciado de aire.

Los condensadores convencionales utilizan sistemas de enfriamiento con fluidos (generalmente agua) para retirar la carga de calor generada por el proceso de condensación. Esto impulsa a buscar alternativas para sistemas de enfriamiento, en este caso optar por tecnologías termoeléctricas que son comerciales, de uso sencillo y que permiten utilizar energías renovables como fototérmica y fotovoltaica, en beneficio para regiones donde hay poca disponibilidad de agua y bastante recurso solar.

Las celdas Peltier, que son dispositivos termoeléctricos (convertidores de energía en estado sólido) que consisten en una serie de pellets de material semiconductor diferente, de tipo N y tipo P encerrados en un material cerámico como se muestra en la Figura 2. Los pellets forman pares termoeléctricos unidos térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. Las caras de alta y baja temperatura dependen de la dirección de la polaridad en que se suministre la tensión de DC a las terminales del dispositivo. Éstos pueden ser utilizado para enfriamiento, calefacción o generar energía [3].

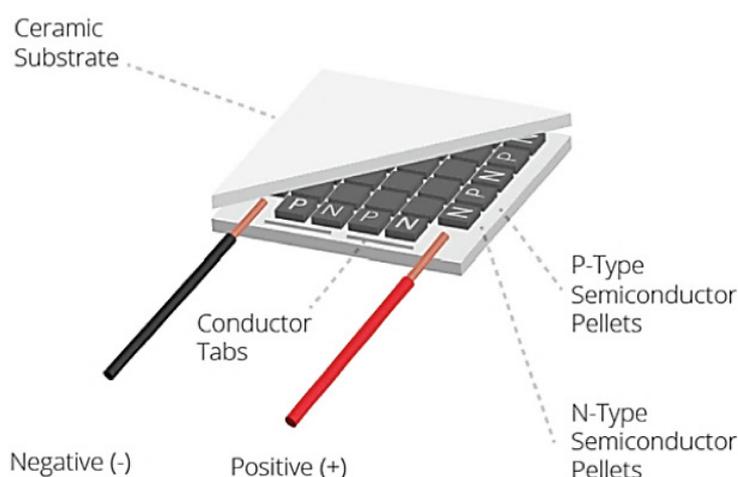


Figura 2. Destilación por membrana con espaciado de aire.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la tasa de desorción de vapor de agua a partir de una mezcla acuosa de LiBr en un prototipo desorbedor/condensador de membrana semipermeable hidrófoba con dispositivos termoeléctricos en la zona de condensación para demostrar que las celdas Peltier pueden ser una alternativa al sistema de enfriamiento convencional con fluidos.

2. Metodología

El desorbedor/condensador mostrado en la Figura 3, tiene una altura de 300 mm de alto y 200 mm de ancho, y se conforma de dos placas de Nylamid de 1 pulgada de espesor para evitar la pérdida de calor, una malla de acero inoxidable Mesh #4 para soporte de la membrana, una membrana PTFE (conocida comercialmente FGLP29325), una lámina de aluminio calibre 26 (como placa de refrigeración), una placa de aluminio aletada en una de sus caras para mejor dispersión de calor y maquinada con espacios para las celdas Peltier en el otro lado, 8 celdas Peltier (con el lado de baja temperatura hacia la lámina de aluminio) conectadas en serie a una fuente de alimentación PHOENIX CONTACT Modelo QUINT-PS/1A-C/24DC/20-2866776 para regular la CC que ingresa a las celdas Peltier, tres hojas de silicón de alta temperatura con 3 mm de espesor, tres hojas de neopreno de 1 mm de espesor y doce juegos de tornillos $3/8 \times 4 \frac{1}{2}$ pulgadas con sus respectivas tuercas para la unión del sistema.



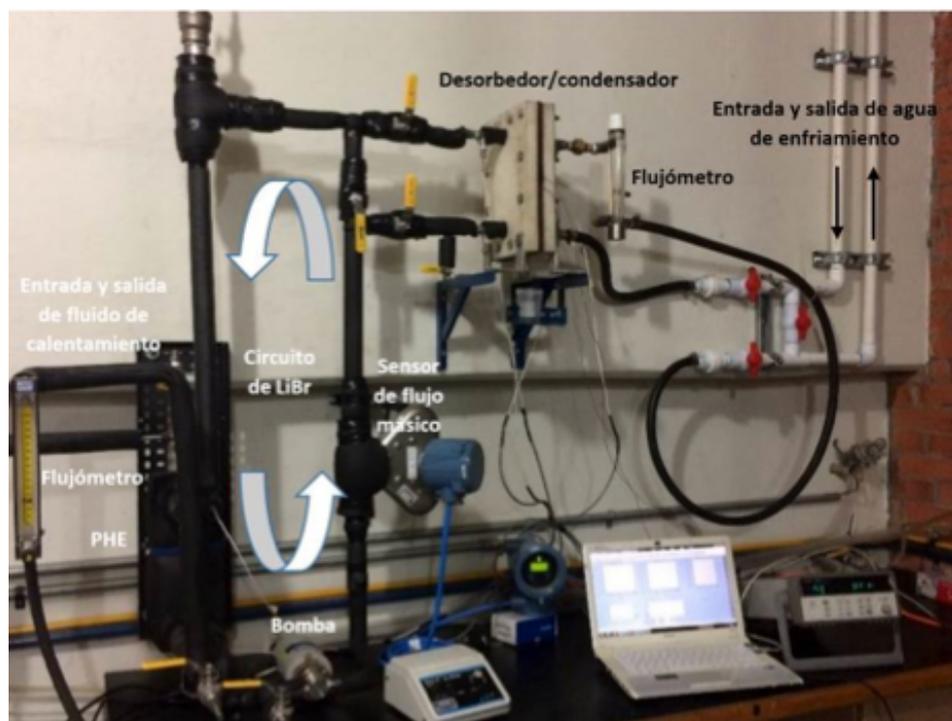
Figura 3. Modelo desorbedor/condensador.

El canal de la solución de LiBr se encuentra formado entre la tapa de Nylamid 1A, un sello de silicón y una cara de la membrana; el espaciamiento de aire se forma entre la otra cara de la membrana pasando por dos sellos de neopreno, la malla metálica, un sello de silicón y la placa de aluminio que funciona como placa de condensación y el canal del agua de enfriamiento para disipar el calor que generan las celdas Peltier es formado entre la placa aletada, el sello de silicón y la tapa de Nylamid 1B.

Acoplado a esta unidad desorbedor/condensador se utilizó un tanque de almacenamiento de agua de 500 litros de capacidad y una bomba para circular el agua de enfriamiento para remover el calor de la cara aletada de la placa (que da al lado de alta temperatura de las celdas Peltier), se utilizó un baño térmico de 1000 W con regulador de temperatura y 15 litros de capacidad para mantener la temperatura de la solución de LiBr constante. Con un medidor de flujo coriolis marca Emerson modelo CNG050 se midió el caudal másico de la solución de LiBr. Se colocaron sensores tipo RTD pt100 para medir la temperatura a la entrada y salida del desorbedor/condensador, así como del intercambiador de calor de placas (PHE) AlfaNova modelo 27-20H utilizado para calentar la solución de LiBr, una bomba de engranes de velocidad variable con cabezal de acero inoxidable marca Cole Parmer modelo L22094A, el equipo experimental se observa en la Figura 4.

Se realizaron pruebas experimentales con las siguientes condiciones de operación: Las temperaturas de la solución acuosa de LiBr: $75.2^{\circ}\text{C}\pm 0.1$, $80.2^{\circ}\text{C}\pm 0.1$, $85.3^{\circ}\text{C}\pm 0.1$, $90.3^{\circ}\text{C}\pm 0.1$, $95.4^{\circ}\text{C}\pm 0.1$. El proceso de desorción se llevó a cabo a presión atmosférica, con un flujo másico de la solución de LiBr constante de $2.50\text{E}-2$ kg/s, una concentración de LiBr en la mezcla de trabajo de $49.74\pm 0.02\%$ (en peso), flujo de agua constante de $3.3\text{E}-2$ kg/s y la temperatura del agua de enfriamiento fue de $24.8\pm 1.4^{\circ}\text{C}$.

a)



b)



c)

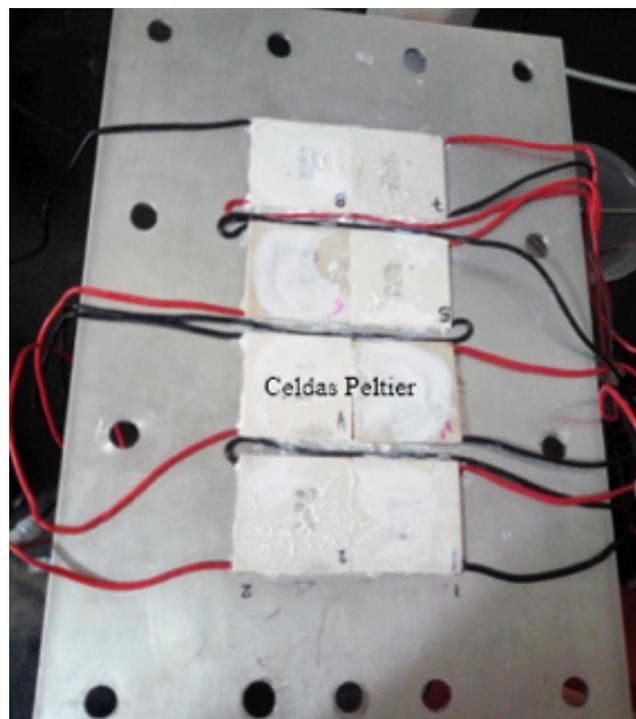


Figura 4. (a) Instalación experimental del prototipo desorbedor/condensador de membrana porosa hidrófoba, (b) Celdas Peltier dentro del desorbedor/condensador y conectadas a una fuente de energía eléctrica, (c) Celdas Peltier colocadas en una placa aletada para mejorar la disipación de calor.

3. Resultados

Se realizaron pruebas experimentales con ocho celdas Peltier incorporadas a una unidad desorbedor/condensador. La velocidad de desorción obtenida fue de 1.32 kg/m² h con 75 °C (± 0.5) y 3.41 kg/m² h con 95°C (± 0.5). A medida que la temperatura de la solución de LiBr aumenta la velocidad de desorción aumenta de forma no lineal (reflejado en el cambio de pendiente entre los puntos) debido a la relación que mantiene con la presión de vapor de agua, como se puede ver en la Figura 2. Las tendencias de la velocidad de desorción son similares a los reportados en trabajos previos [1,4], sin embargo, la velocidad de desorción es menor que con un sistema de enfriamiento por agua utilizado en la zona de condensación, esto es debido a que la eficiencia de enfriamiento de la celda Peltier está relacionada con la capacidad que retirar el calor del lado caliente, sin embargo, este problema puede resolverse con un mejor diseño en los disipadores de calor de las placas Peltier. El aumento en la cantidad de fluido refrigerante separado por el desorbedor/condensador tendría repercusión en todo un sistema de enfriamiento por absorción, ya que, al disponer de una mayor cantidad de fluido refrigerante, la potencia térmica del evaporador aumenta y, como resultado, el Coeficiente de Operación (COP) de todo el sistema también. Los resultados muestran que las celdas Peltier pueden ser utilizadas en la zona de condensación de un desorbedor/condensador de membrana semipermeable hidrófoba en el rango de temperaturas de la solución acuosa de LiBr que se evaluó. Sin embargo, para generar modelos matemáticos que permitan dimensionar sistemas de absorción a escala planta piloto o incluso escala industrial, hace falta cuantificar el efecto de otras variables de operación como concentración de LiBr en la solución acuosa, tamaño de poro, caudal másico de la solución y potencia eléctrica de las celdas Peltier. En trabajos reportados en la literatura se ha investigado sobre el proceso de desorción/condensación con membranas semipermeables hidrófobas [1,4], pero sin la utilización de celdas Peltier en la zona de condensación, lo que abre un nicho de oportunidad de investigación científica.

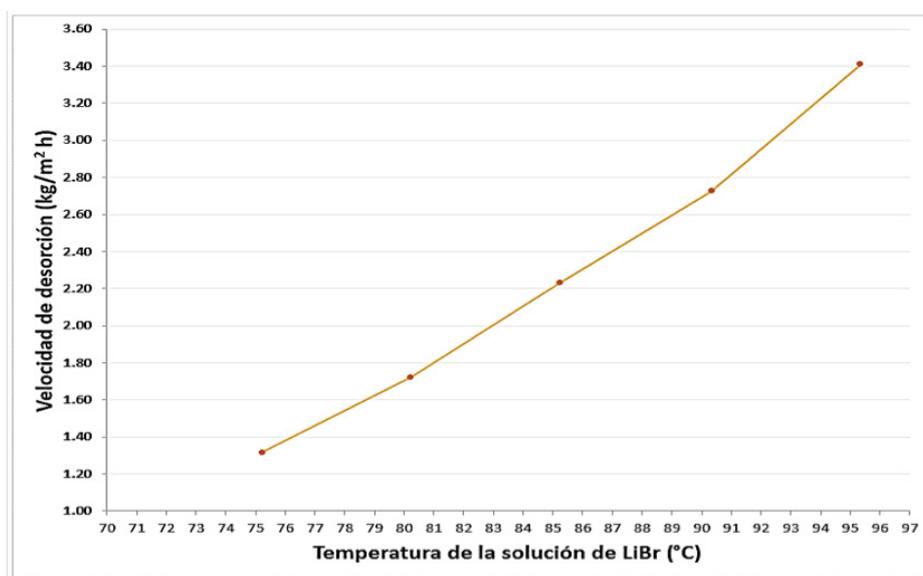


Figura 5. Velocidad de desorción en función de la temperatura de la solución de LiBr.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se acoplaron dispositivos termoeléctricos (celdas Peltier) como sistema de enfriamiento, en lugar del sistema convencional con fluidos a una unidad desorbedor/condensador para separar agua (fluido refrigerante) de una solución acuosa LiBr (mezcla de trabajo) en una serie de pruebas experimentales.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar que a medida que aumenta la temperatura de la solución de LiBr la velocidad de desorción aumenta de forma no lineal. A partir de los experimentos llevados a cabo, se demuestra que el uso de celdas Peltier acopladas a un prototipo desorbedor/condensador de membrana semipermeable hidrófoba es factible y son capaces de generar el efecto de enfriamiento necesario para la condensación sin necesidad de un sistema convencional de fluidos. Además, el dispositivo propuesto permite la utilización de los dos tipos principales de energía solar: fotovoltaica y fototérmica, esto lo hace viable en lugares donde el recurso solar abunda y la cantidad de agua es menor.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Proyecto CEMIE-SOL P09 “Desarrollo de sistemas de enfriamiento operados con energía solar” del Fondo Sectorial CONACyT – SENER y al Proyecto de Ciencia Básica 167434 de CONACyT. Jonathan Ibarra Bahena agradece al CIC – UNAM 2019 por la beca posdoctoral recibida.

6. Referencias

- [1] J. Ibarra – Bahena, U. Dehesa – Carrasco, R.J. Romero, B. Rivas – Herrera, W. Rivera, “Experimental assessment of a hydrophobic membrane-based desorber/condenser with H₂O/LiBr mixture for absorption systems”, *Exp. Ther. Fluid Sci.*, Vol. 88 (2017), pp. 145-159.
- [2] U. Dehesa – Carrasco, C.A. Pérez - Rábago, C.A. Arancibia - Bulnes, “Experimental evaluation and modeling of internal temperatures in an air gap membrane distillation unit”, *Desalination.*, Vol. 326, pp. 47 - 54, octubre 2013.
- [3] Simon Lineykin, Shmuel Ben-Yaakov, “Modeling and analysis of thermoelectric Modules”, *IEE T. and Appl.*, Vol. 43, No. 2 (2017).
- [4] Ibarra-Bahena, J., Dehesa-Carrasco, U., Montiel-González, M., Romero, R.J., Basurto-Pensado, M.A., Hernández-Cristóbal, O., “Experimental evaluation of a membrane contactor unit used as a desorber/condenser with water/Carrol mixture for absorption heat transformer cycles”, *Exp. Therm. Fluid Sci.* Vol. 76 (2016), pp. 193 – 204.

DETECCIÓN DE DERIVADOS DEL FENOL MEDIANTE ULTRAMICROELECTRODOS DE FIBRA DE CARBONO Y ORO

J. Delgado-Avilez^{1,2}, G.A. Huerta-Miranda¹, M. Miranda-Hernández^{1*}

¹*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco, 62580, Temixco, Morelos, México*

²*Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica No.1, Col. Palo Escrito C.P. 62760, Emiliano Zapata, Morelos, México.*

*mmh@ier.unam.mx**

Resumen: El catecol, resorsinol e hidroquinona son isómeros derivados del fenol, con fórmula molecular similar $C_6H_4(OH)_2$ y estructura diferente en posición orto, meta y para, respectivamente. Se emplean ampliamente en diferentes procesos industriales, por lo cual se presentan en desechos de efluentes industriales y dada su toxicidad, representan un riesgo importante para el medio ambiente y salud. Actualmente existen metodologías para su degradación o eliminación por adsorción, sin embargo la detección a bajas concentraciones de estos compuestos se ha vuelto un reto para el desarrollo de dispositivos de cuantificación. En este trabajo se propone el uso de sensores electroquímicos basados en ultramicroelectrodos de fibra de carbono y oro para la detección en bajas concentraciones del orden de μM . Se emplea la técnica de voltamperometría lineal en el sistema electrolítico 0.1M buffer de fosfatos/1M KNO_3 pH 6.5, mediante adiciones estándar.

Palabras clave: *Sensores electroquímicos, ultramicroelectrodos, fibra de carbono, derivados de fenol.*

1. Introducción

Los derivados de fenol son ampliamente utilizados en la industria para la elaboración de: cosméticos, textiles, pesticidas y en otros productos químicos. Los compuesto fenólicos más reportados son catecol (CT), resorcinol (RS) e hidroquinona (HQ), porque poseen importantes propiedades biológicas y farmacológicas, tales como antiinflamatorias y antibacterianas [1, 2]. La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) y la Unión Europea (UE), debido a su alta toxicidad y baja degradabilidad, los consideran contaminantes ambientales de alto riesgo para los ecosistemas acuáticos e incluso el hombre [3]. Ante este hecho actualmente ha aumentado el interés por proponer soluciones innovadoras para su detección y eliminación en efluentes de diferentes orígenes industriales.

Estas moléculas son isómeros del dihidroxibenceno, orto, meta y para, respectivamente. Consiste en dos grupos funcionales hidroxilo (OH-) unido a un grupo de hidrocarburo aromático, con una estructura de anillo como la del benceno (ver fig. 1) [2].

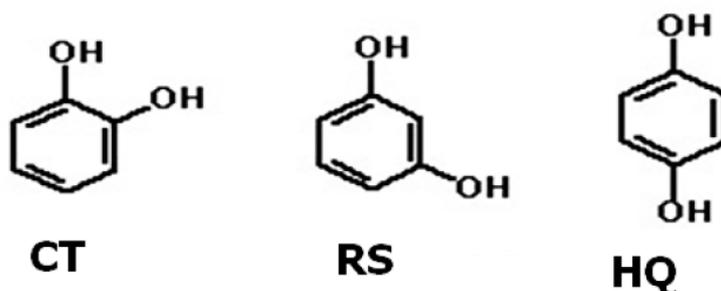


Figura 1 Estructura química del Catecol (CT), Resorcinol (RS) e Hidroquinona (HQ).

En los últimos años se han reportado métodos de confinamiento y degradación tales como: absorción [2, 4], biodegradación [5, 6] y membranas de separación [7]. A pesar de estos avances aún prevalece la necesidad de detectar y cuantificar en concentraciones del orden μM . Algunos métodos implementados como la electroforesis capilar, espectrofotometría [8], técnicas cromatografías (HPLC, CG y GC-MS) [7, 9], fluorescencia [3, 10] y quimioluminiscencia [11], suelen tener procedimientos complicados así como requerir equipos y mantenimiento con elevado costo. Una alternativa son los métodos electroquímicos que exhiben ventajas como fácil implementación, costo relativamente más accesible, buena sensibilidad y un amplio intervalo de detección comparados con los métodos anteriormente mencionados [12]. Aprovechando las propiedades de óxido-reducción de los isómeros, se pueden implementar una gran variedad de técnicas, entre ellas: voltametría cíclica, cronoamperometría, cronocoulometría, voltametría de pulso diferencial y voltametría de barrido lineal [12–17]. Los métodos electroquímicos utilizan electrodos detectores, los cuales pueden ser de diferente composición. Actualmente el desarrollo de nanomateriales (nanopartículas de metales o polímeros conductores) y nanocompositos de materiales carbonosos (carbón vítreo, fibra de carbono, grafitos, nanotubos, grafenos) se han reportado como electrodos para la detección de estos compuestos, [14, 17–23] Se reporta que la dimensión a nanoescala posee grandes ventajas, pues amplía la ventana de detección además de requerir cantidades de muestra relativamente bajas (mL). Considerando que las dimensiones del electrodo es crítico para la detección de sustancias en ppm y ppb, el uso de ultramicroelectrodos (UME's con radios de 25 μm hasta 100 nm [24]) podrían ser una opción viable para la detección y cuantificación de estas tres moléculas fenólicas en volúmenes de muestra menores de 100 μL y concentraciones del orden μM [25]. En este trabajo se presenta la detección y cuantificación de CT, RS e HQ con ultramicroelectrodos de fibra de carbono y oro

con radios de 600 nm y 700 nm, respectivamente, utilizando la técnica de adiciones estándar mediante voltamperometría de barrido lineal.

2. Desarrollo experimental

Los estudios electroquímicos se realizaron en una celda electroquímica de tres electrodos, donde el electrodo de referencia fue Ag/AgCl (0.22 V vs. NHE), el contra electrodo un alambre de Pt y los electrodos de trabajo fueron los diferentes ultramicroelectrodos de fibra de carbono (UME-CF) y oro (UME-Au). Los UME-CF se elaboraron mediante un método desarrollado por el grupo de trabajo, reportada por Arrocha-Arcos [26]. Los UME's de oro se prepararon por electrodeposición a partir de un baño electrolítico reportado por Huerta-Miranda [27]. La evaluación de los radios se realizó para ambos UME's mediante la técnica reportada [28]. La detección y cuantificación de CT, RS y HQ, se realizó con el método de adiciones estándar, y la técnica de voltamperometría de barrido lineal a 10 mV/s, iniciando el barrido desde el potencial de circuito abierto (OCP) de cada sistema hasta 0.7 V o 1.2 V vs. Ag/AgCl, en un electrolito 100 mM buffer de fosfatos/1 M KNO₃, pH 6.5 (ver fig. 2) utilizando un volumen en la celda de 5 mL. Se añadieron alícuotas de 5 µL de solución 100 mM de cada muestra previamente preparadas, hasta cubrir un intervalo de concentraciones de 100 µM a 1 mM para la detección con UME-CF y 40 µM a 1 mM para la detección con UME-Au. Las determinaciones se realizaron de manera independiente. Todos los estudios se llevaron a cabo en un Potenciostato Uniescan Instrument M370.

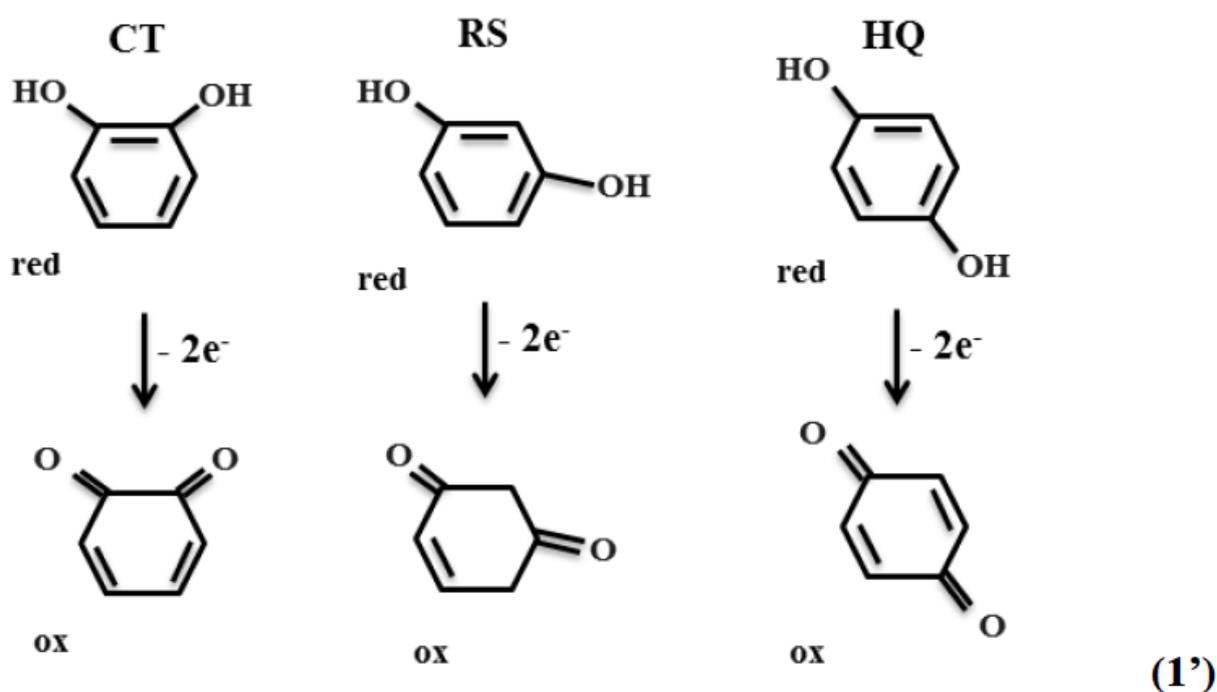
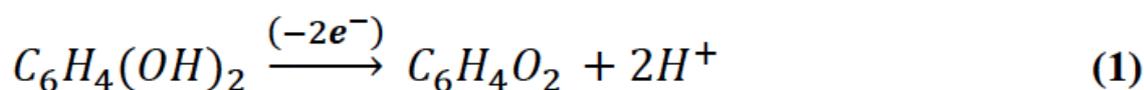


Figura 2 Sistema experimental para determinación de moléculas fenólicas

3. Resultados

3.1 Detección de los isómeros con UME-CF

La figura 3 A-C muestra las respuestas de voltamperometría lineal obtenidas en 100 mM buffer fosfatos/1 M KNO_3 , pH 6.5, utilizando UME-CF, para la detección de CT (A), HQ (B) y RS (C) mediante adiciones estándar con diferentes concentraciones (indicadas en la figura). Las respuestas de densidad de corriente-potencial para CT e HQ tienen una singular forma de "f", característica del estado estacionario de un ultramicroelectrodo [26, 27], la meseta o corriente límite (I_L) se presenta en una amplia zona de potencial de oxidación de 0.25 a 0.7 y 0.16 a 0.7 V, respectivamente. La reacción de oxidación está representada por la ecuación general (1) y reacción específica para cada isómero (1'). Se observa que al aumentar las adiciones de cada compuesto la corriente también aumenta, esto indica que CT e HQ pueden ser detectados mediante el UME-CF. Considerando la respuesta del RS (C) en este caso no se define la meseta de estado estacionario y la corriente es independiente de las adiciones, lo que sugiere que para RS es posible detectarlo, pero no cuantificarlo totalmente con esta técnica. Posiblemente se deba a que la oxidación de esta molécula involucra una etapa intermedia en la reacción 1.



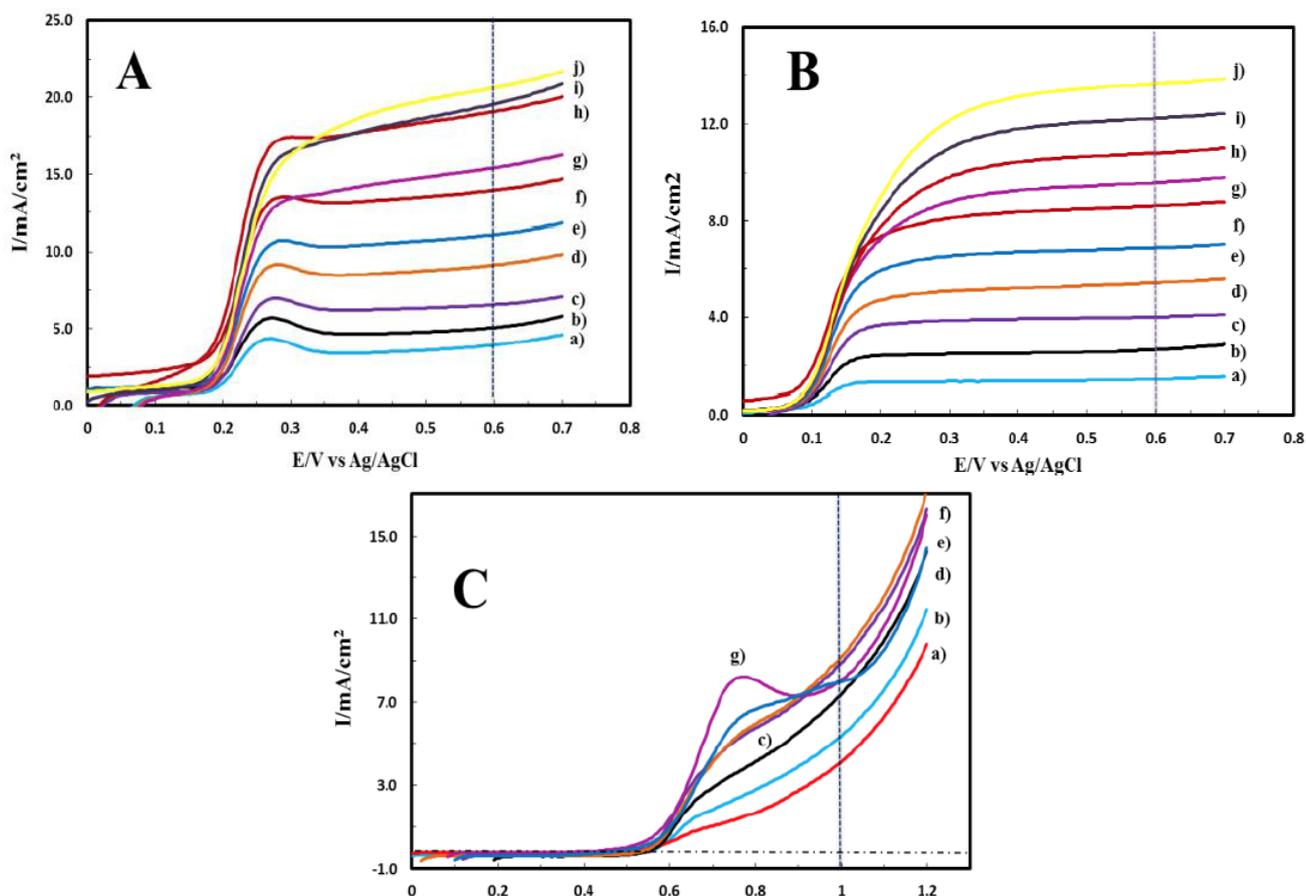


Figura 3 Respuesta de voltamperometría lineal obtenidas en 100 mM buffer fosfatos/1M KNO₃, pH 6.5, utilizando UME-CF. Para la detección de CT (A), HQ (B) y RS (C) mediante adiciones estándar de diferentes alícuotas para obtener las siguientes concentraciones en μM : a) 40, b) 100, c) 200, d) 300, e) 400, f) 500, g) 600, h) 700, i) 800, j) 900 y k) 1000 para CT e HQ. Para RS las concentraciones en μM fueron: a) 40, b) 100, c) 200, d) 300, e) 400, f) 600 y g) 800.

3.2 Detección de los isómeros con UME-Au

La figura 4 A-C corresponde a las respuestas de voltamperometría lineal obtenidas en 100 mM buffer fosfatos/1 M KNO₃, pH 6.5, utilizando UME-Au, para la detección de CT (A), HQ (B) y RS (C) mediante adiciones estándar con diferentes concentraciones (indicadas en la figura 4). Las respuestas de densidad de corriente-potencial para CT e HQ muestran una corriente límite (IL) en una amplia zona de potencial de oxidación similar a las obtenidas con UME-CF y representadas por las reacciones 1 y 1'. Se observa que al aumentar las adiciones de cada compuesto la corriente también aumenta, esto indica que CT e HQ pueden ser detectados mediante el UME-Au. Para el caso del RS no se define la meseta de estado estacionario, la corriente es independiente de las adiciones. En el recuadro de la fig. 4 C se muestra una zona de potencial de una primera etapa I' de oxidación y posteriormente se completa el proceso de oxidación en I; lo que sugiere que la oxidación de esta molécula se realiza en etapas, por esta razón posiblemente no es posible cuantificarlo con el método de adiciones estándar.

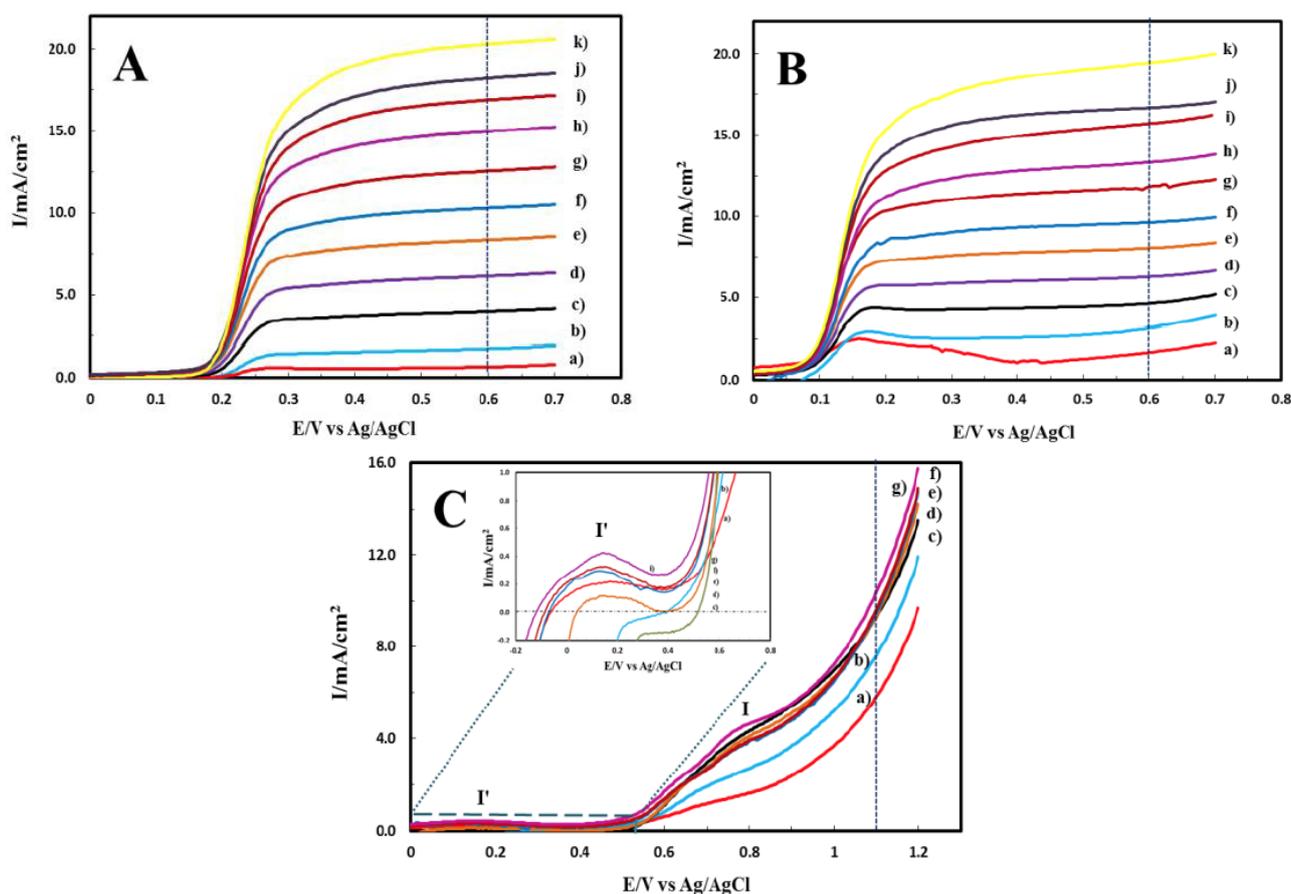


Figura 4 Respuesta de voltamperometría lineal obtenidas en 100 mM buffer fosfatos/1 M KNO_3 , pH 6.5, utilizando UME-Au. Para la detección de CT (A), HQ (B) y RS (C) mediante adiciones estándar de diferentes alícuotas para obtener las siguientes concentraciones en μM : a) 40, b) 100, c) 200, d) 300, e) 400, f) 500, g) 600, h) 700, i) 800, j) 900 y k) 1000 para CT e HQ. Para RS las concentraciones en μM fueron: a) 40, b) 100, c) 200, d) 300, e) 400, f) 600 y g) 800.

Considerando las respuestas de I_L del estado estacionario de las figuras 3 y 4, es posible evaluar el potencial de onda media simbolizado por $E_{(1/2)}$, este parámetro guarda una estrecha relación con el potencial estándar de la semireacción y es útil para identificar los componentes redox de una disolución [29]. Los valores de $E_{(1/2)}$ corresponden al potencial asociado a la mitad del valor de I_L . La tabla 1, muestra los $E_{(1/2)}$ obtenidos con los diferentes UME's a diferentes concentraciones (100, 500 y 1000 μM) para CT, HQ. Mientras que para el RS se utilizaron la corriente correspondientes a las concentraciones 40, 200 y 800 μM . Los valores de la tabla 1 para un mismo isómero, sugieren que son independientes del tipo de electrodo, además de tener un potencial característico para cada uno de ellos, es decir que en una mezcla de estas moléculas se pueden identificar por su $E_{(1/2)}$. Tomando en cuenta el valor de $E_{(1/2)}$, se sugiere que primero se identificaría la HQ, seguido de CT y finalmente RS, en este estricto orden. Los valores de $E_{(1/2)}$ concuerdan con trabajos publicados anteriormente utilizando electrodo de referencia Ag/AgCl [13, 27, 28].

Electrodo		CT	HQ	RS
UME-CF	C/ μ M	$E_{(1/2)}/V$	$E_{(1/2)}/V$	* $E_{(1/2)}/V$
	100	0.21	0.13	0.66
	500	0.22	0.14	0.65
	1000	0.23	0.16	0.66
UME-Au	C/ μ M	$E_{(1/2)}/V$	$E_{(1/2)}/V$	* $E_{(1/2)}/V$
	100	0.24	0.12	0.65
	500	0.235	0.14	0.65
	1000	0.235	0.15	0.64

Tabla 1 Potencial de media onda ($E_{(1/2)}$) obtenidos con los diferentes UME's en concentración 100, 500 y 1000 μ M de CT, HQ y para * $E_{(1/2)}$ 40, 200 y 800 μ M de RS.

En la figura 5 A-B se muestran las curvas de calibración de CT (A) e HQ (B) de ambos electrodos obtenidas a partir de los resultados de las figuras 3 y 4. A partir de la relación del ajuste lineal (indicadas en la figura) y con mínimos cuadrados se obtuvieron los límites de detección y cuantificación reportados en la Tabla 2.

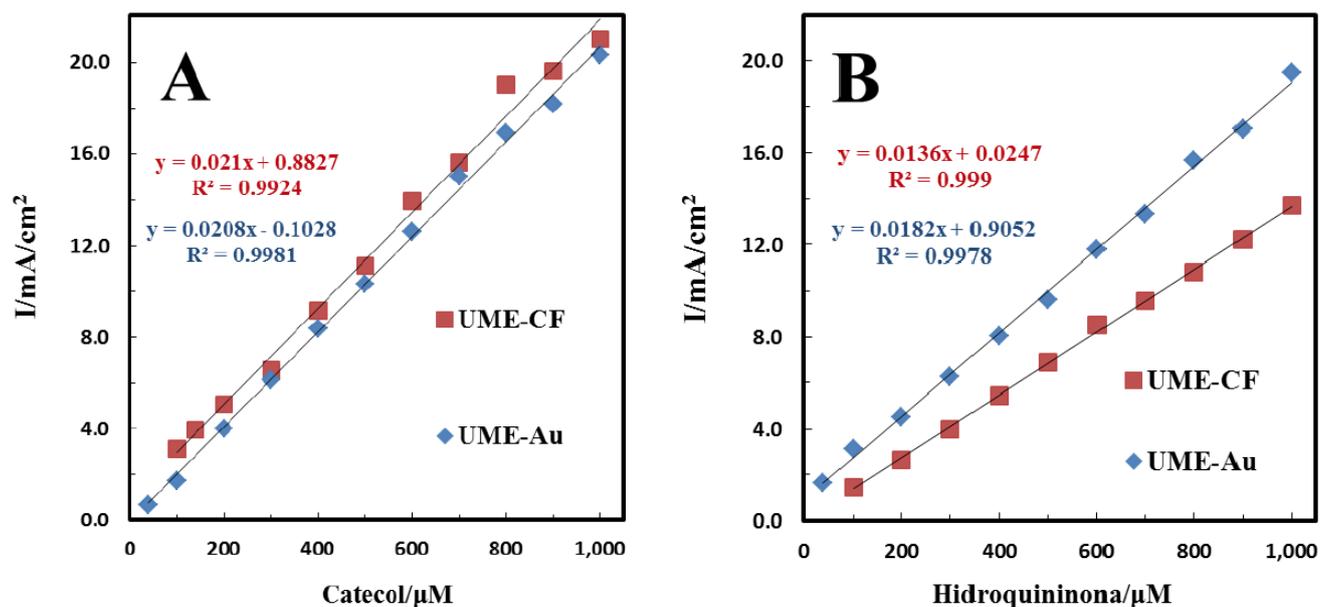


Figura 5 Comparación de curva de calibración de las respuestas obtenidas con UME-Au y UME-CF en intervalo de 40 μ M a 1 mM para catecol (A) e hidroquinona (B).

Se considera el límite de detección (LOD) como la concentración del analito detectable por el método y al límite de cuantificación (LOQ) como la más pequeña concentración del analito que puede ser determinada con un nivel de exactitud y precisión aceptables.

	UME-CF		UME-Au	
	CT	HQ	CT	HQ
LOD (μM)	3	4	2	2
LOQ (μM)	9	14	7	7

Tabla 2 Límites de detección y cuantificación de CT e HQ en UME-CF y UME-Au.

Los mejores valores de LOD y LOQ son los correspondientes al UME-Au, esto indica que el Au es más catalítico. Los autores Harisha [30] y Tsai [21] reportan una colección de valores de LOD obtenidos por varios autores, con diferentes tipos de electrodos (Tablas AT1 y AT2, ver anexo). Comparando los valores obtenidos en este trabajo, se observa que los límites son aceptables y se encuentran en los intervalos reportados, lo que confirma la aplicación de los UME's como una buena alternativa para la detección de estos isómeros.

4. Conclusiones

En este trabajo logró la implementación de UME de fibra de carbono y oro para la detección de CT, RS e HQ. La metodología de adiciones estándar, cuantificó CT e HQ en un intervalo de 100 μM a 1 mM y 40 μM a 1 mM para UME-CF y UME-Au respectivamente, utilizando volúmenes de muestras total de 50 μL . Es importante mencionar que los UMEs se obtuvieron con metodología *homemade* de fabricación. Respecto al RS no fue posible cuantificarlo por el método de adiciones estándar, sin embargo esta molécula se puede detectar por ambos UME's. Como lo confirman los diferentes valores de $E_{(1/2)}$. Que muestran un potencial característico para cada isómero. Los resultados de LOD y LOQ calculados para CT e HQ compiten con los reportados con electrodos modificados con nanopartículas y nanocompuestos de materiales carbonosos, lo que sugiere que los ultramicroelectrodos son una excelente opción para su detección y cuantificación, además de evitar engorrosos procedimientos de preparación y caracterización de materiales compósitos comúnmente utilizados.

5. Anexo

En la tabla AT 1 se observan resultados de LOD's de CT e HQ de diferentes electrodos modificados, obtenidos por diferentes técnicas electroquímicas (DPV = Voltamperometría diferencial de pulso, CV= Voltamperometría cíclica y LSV= Voltamperometría de barrido lineal.) según K. Harisha.

Electrodos Modificados	Límite de detección (μM)		Método electroquímico
	CT	HQ	
LDHf/GCE	1.2	9.0	DPV
LRG/GCE	0.8	0.5	DPV
Poly(Phenylalanine)	0.7	1.0	DPV
MWNT/GCE	0.2	0.75	DPV
MWCNT–NF–PMG/GCE	31.0	18.1	CV
Silsesquioxane/MCPE	10	10	DPV
[Cu(Sal- β -Ala)(3,5-DMPz) ₂]/MWCNTs/GCE	3.5	1.46	DPV
Influence of micelles/GCE	3.0	8.0	DPV
CN _x /GCE	2.71	1.20	LSV
Poly(calmagite) MCPE	2.55	1.70	CV
RGO–MWNTs	1.8	2.6	DPV
Poly(glycine) modified CPE	0.16	0.20	CV

Tabla AT 1 Comparación del límite de detección con diferentes electrodos modificados reportada por Harisha et al, 2018 [30].

En la tabla AT 2 es una comparación de la sensibilidad de algunos electrodos para la detección de CT e HQ de diferentes materiales de electrodo (GCE) y sus respectivos límites de detección según Tsai.

Materiales de electrodo	Límite de detección (μM)		Límite de detección (μM)	
	HQ	CT	HQ	CT
GO–mesoporous/MnO ₂	0.007	0.01	0.01-0.7	0.03-1
Graphene and TiO ₂ nanoparticles	0.082	0.087	0.5-100	0.5-100
ZnO nanorod/Graphene	0.1	0.2	0-70	0-80
Pt/ZrO ₂ -RGO	0.4	0.4	1-400	1-1000
AuNPs-Fe ₂ O ₃ -APTES-GO	1.1	0.8	3-137	2-145
NiO/CNT	2.5	2.5	10-500	10-400
Gold-graphene	0.2	0.15	1-100	1-100
Porous reduced graphene oxide	0.08	0.18	0.5-90.	5-120
Graphene-like carbon nanosheets	0.02	0.05	0.1-30	0.5-50
WS ₂ -graphene	0.1	0.2	1-100	1-100
Carbon dot/reduced GO	0.17	0.28	0.5-100	1-950
P4VPBA/PPy/GO	0.53	0.96	4.0-22	7.0-16
Au-Pd nanoflower/rGO	0.5	0.8	1.6-100	2.5-100
Pyridine-nitrogen doped graphene	0.38	0.01	5-200	5-200
MOF-electrochemical reduced GO	0.1	0.1	0.1-476	0.1-566
AuNPs/RGO/WO ₃	0.36	0.020	0.1-10	0.1-10

Tabla AT 2 La comparación del rendimiento de sensores electroquímicos reportados por Tsai et al, 2018 [21].

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del proyecto PAPIIT-DGAPA-UNAM (IN204218). G. A. Huerta-Miranda agradece la beca para estudios de posgrado CONACYT, J. Delgado-Avilez agradece al IER-UNAM por el apoyo brindado para la realización de la estancia académica.

7. Referencias

- [1] S. P. Verevkin and S. A. Kozlova, "Di-hydroxybenzenes: Catechol, resorcinol, and hydroquinone. Enthalpies of phase transitions revisited," *Thermochim. Acta*, vol. 471, no. 1–2, pp. 33–42, 2008.
- [2] S. Suresh, V. C. Srivastava, and I. M. Mishra, "Equilibrium Modeling of Ternary Adsorption of Phenols onto Modified Activated Carbon," *Theor. Found. Chem. Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 271–285, 2018.
- [3] T. Xie, Q. Liu, Y. Shi, and Q. Liu, "Simultaneous determination of positional isomers of benzenediols by capillary zone electrophoresis with square wave amperometric detection," *J. Chromatogr. A*, vol. 1109, no. 2, pp. 317–321, Mar. 2006.
- [4] S. Yang, D. Ma, and P. Cui, "Liquid-Liquid Equilibrium Data and Correlation for the Quaternary Systems Water + Polyphenol (Hydroquinone, Catechol, and Resorcinol) + Methyl Isobutyl Ketone + Methylbenzene," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 63, no. 1, pp. 63–68, 2018.
- [5] C. C. Lobo, N. C. Bertola, and E. M. Contreras, "Inhibition kinetics during the oxidation of binary mixtures of phenol with catechol, resorcinol and hydroquinone by phenol acclimated activated sludge," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 59–71, 2016.
- [6] S. Ferreira-Guedes and A. L. Leitão, "Simultaneous removal of dihydroxybenzenes and toxicity reduction by *Penicillium chrysogenum* var. *halophenolicum* under saline conditions," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 150, no. August 2017, pp. 240–250, 2018.
- [7] M. Sun et al., "Enhanced removal ability of phenol from aqueous solution using coal-based carbon membrane coupled with electrochemical oxidation process," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 540, no. October 2017, pp. 186–193, 2018.
- [8] P. Nagaraja, R. A. Vasantha, and K. R. Sunitha, "A sensitive and selective spectrophotometric estimation of catechol derivatives in pharmaceutical preparations," *Talanta*, vol. 55, no. 6, pp. 1039–1046, Dec. 2001.
- [9] Z. Li, Y. Yue, Y. Hao, S. Feng, and X. Zhou, "A glassy carbon electrode modified with cerium phosphate nanotubes for the simultaneous determination of hydroquinone, catechol and resorcinol," *Microchim. Acta*, vol. 185, no. 4, 2018.
- [10] Y. Liu et al., "Highly selective and sensitive fluorescence detection of hydroquinone using novel silicon quantum dots," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 275, no. August, pp. 415–421, 2018.
- [11] Y. Chao, X. Zhang, L. Liu, L. Tian, M. Pei, and W. Cao, "Determination of hydroquinone by flow injection chemiluminescence and using magnetic surface molecularly imprinted particles," *Microchim. Acta*, vol. 182, no. 5–6, pp. 943–948, 2015.
- [12] A. R. L. da Silva and A. J. dos Santos, "Electrochemical measurements and theoretical studies for understanding the behavior of catechol, resorcinol and hydroquinone on the boron doped diamond surface," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 7, pp. 3483–3492, 2018.
- [13] H. Daneshinejad, M. A. Chamjangali, N. Goudarzi, and A. H. Amin, "Modification of glassy carbon electrode with poly (hydroxynaphthol blue) / multi-walled carbon nanotubes composite and construction a new voltammetric sensor for the simultaneous determination of hydroquinone, catechol, and resorcinol Modification of," *Mater. Res. Express*, vol. 5, no. 35307, p. 35307, 2018.
- [14] C. Peng et al., "Simultaneous Determination of Hydroquinone, Catechol and Resorcinol with High Selectivity Based on Hollow Nitrogen-Doped Mesoporous Carbon Spheres Decorated Graphene," vol. 165, no. 5, pp. 212–219, 2018.
- [15] C. Wei et al., "Simultaneous electrochemical determination of hydroquinone, catechol and resorcinol at Nafion/multi-walled carbon nanotubes/carbon dots/multi-walled carbon nanotubes modified glassy carbon electrode," *Electrochim. Acta*, vol. 149, pp. 237–244, 2014.
- [16] K. He, X. Wang, X. Meng, H. Zheng, and S. Suye, "Amperometric determination of hydroquinone and catechol on gold electrode modified by direct electrodeposition of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 193, pp. 212–219, Mar. 2014.

- [17] K. J. Huang et al., "Synthesis and electrochemical performances of Layered tungsten sulfide-graphene nanocomposite as a sensing platform for catechol, resorcinol and hydroquinone," *Electrochim. Acta*, vol. 107, pp. 379–387, 2013.
- [18] H. Yin et al., "Electrochemical behavior of catechol, resorcinol and hydroquinone at graphene-chitosan composite film modified glassy carbon electrode and their simultaneous determination in water samples," *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 6, pp. 2748–2753, 2011.
- [19] C. Yang, Y. Chai, R. Yuan, W. Xu, and S. Chen, "Gold nanoparticle-graphene nanohybrid bridged 3-amino-5-mercapto-1,2,4-triazole-functionalized multiwall carbon nanotubes for the simultaneous determination of hydroquinone, catechol, resorcinol and nitrite," *Anal. Methods*, vol. 5, no. 3, pp. 666–672, 2013.
- [20] Y. Wu et al., "Simultaneous electrochemical sensing of hydroquinone and catechol using nanocomposite based on palygorskite and nitrogen doped graphene," *Appl. Clay Sci.*, vol. 162, no. May, pp. 38–45, 2018.
- [21] M. S. Tsai, C. J. Lu, and P. G. Su, "One-pot synthesis of AuNPs/RGO/WO₃nanocomposite for simultaneously sensing hydroquinone and catechol," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 215, no. August 2017, pp. 293–298, 2018.
- [22] R. Chen et al., "One-pot green synthesis of Ag/AgCl nanocube/reduced graphene oxide and its application to the simultaneous determination of hydroquinone and catechol," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 55, pp. 44165–44172, 2015.
- [23] A. T. E. Vilian, S. M. Chen, L. H. Huang, M. A. Ali, and F. M. A. Al-Hemaid, "Simultaneous determination of catechol and hydroquinone using a Pt/ZrO₂-RGO/GCE composite modified glassy carbon electrode," *Electrochim. Acta*, vol. 125, pp. 503–509, 2014.
- [24] A. J. Bard, L. R. Faulkner, C. York, W. Brisbane, and S. E. Toronto, *Electrochemistry Methods Fundamentals and Applications*. 2001.
- [25] A. Anilda, M. Casagrande, D. S. Schaumlo, Y. Patr, C. Maria, and S. Piatnicki, "Simultaneous Voltammetric Determination of tert - Butylhydroquinone and Propyl Gallate in Biodiesel – Ethanol at a Pt Ultramicroelectrode," 2017.
- [26] A. A. Arrocha-Arcos, R. Cervantes-Alcalá, G. A. Huerta-Miranda, and M. Miranda-Hernández, "Electrochemical reduction of Bicarbonate to Formate with Silver Nanoparticles and Silver Nanoclusters supported on Multiwalled Carbon Nanotubes," *Electrochim. Acta*, vol. 246, pp. 1082–1087, Aug. 2017.
- [27] G. A. Huerta-Miranda, A. A. Arrocha-Arcos, and M. Miranda-Hernández, "Gold nanoparticles/4-aminothiophenol interfaces for direct electron transfer of horseradish peroxidase: Enzymatic orientation and modulation of sensitivity towards hydrogen peroxide detection," *Bioelectrochemistry*, vol. 122, pp. 77–83, 2018.
- [28] S. Amemiya, A. J. Bard, F. F. Fan, M. V. Mirkin, and P. R. Unwin, "Scanning Electrochemical Microscopy," *Annu. Rev. Anal. Chem.*, vol. 1, no. 1, pp. 95–131, Jul. 2008.
- [29] D. a. Skoog, D. M. West, F. J. Holler, and S. R. Couch, *Fundamentos de Química Analítica*, 8th ed. 2005.
- [30] K. V. Harisha, B. E. Kumara Swamy, and E. E. Ebenso, "Poly (glycine) modified carbon paste electrode for simultaneous determination of catechol and hydroquinone: A voltammetric study," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 823, no. July, pp. 730–736, 2018.

PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

DE CDS DOPADAS IN SITU CON ZINC PARA APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES

**Uziel Galarza-Gutiérrez¹, María de Lourdes Albor-Aguilera^{1*}, Miguel Ángel González-Trujillo²,
Hernani Yee-Madeira¹, Gerardo Ortega-Cervantes¹**

1. Instituto Politécnico Nacional-ESFM, Depto. de Física, U.P.A.L.M. Zacatenco, CDMX, 07738, México

2 Instituto Politécnico Nacional-ESCOM, Depto. de Ciencias Básicas, U.P.A.L.M. Zacatenco,

CDMX, 07738, México Teléfono (55) 5729-6000 Ext. 55054

**E-mail: lourdesalbor10@gmail.com*

Resumen: Actualmente, la mayor parte de la tecnología de celdas solares de película delgada utiliza películas de CdS como material ventana, la función principal del material ventana en una heterounión es formar una unión con la capa absorbente y transmitir una cantidad máxima de luz a la capa absorbente. Sin embargo, como consecuencia de la relativamente baja brecha de banda prohibida del CdS, la mayoría de los fotones azules son absorbidos en la capa ventana y esencialmente no contribuyen a la generación de fotocorriente. Por lo tanto, la brecha de banda prohibida necesita ser ampliada mediante dopajes. El proceso de dopaje para ampliar la brecha de banda prohibida del CdS se estudia en este trabajo mediante dopaje in situ con una solución de Zn a películas de CdS depositadas por baño químico. Se ha observado que, cuando se agregan iones dopantes con radios iónicos ligeramente más pequeños que Cd^{+2} , la conductividad aumenta y la celda unitaria se compacta. En adición, se analizaron las propiedades eléctricas, estructurales, ópticas y morfológicas de las películas obtenidas. Se observó que valor de E_g aumenta con la incorporación de Zn en la red, así mismo las muestras de CdS son menos resistivas con la incorporación del Zn.

1. Introducción

En una celda solar de película delgada, la función principal de una capa de ventana es capturar fotones de la radiación solar en la región visible. Para un alto rendimiento óptico; la brecha de banda prohibida del material ventana debe corresponder con el máximo del espectro de radiación solar en la región visible [1]. La llamada capa ventana, está constituida generalmente por compuestos de azufre. Hasta ahora, las celdas solares más eficientes se fabrican utilizando CdS como capa ventana. El CdS crece in-

trínsecamente con una conductividad eléctrica tipo n, lo que lo convierte en un buen candidato para la formación de la unión con la película CdTe de tipo p [2]. Aunque CdTe tiene una brecha de banda prohibida (E_g) de 1.45 eV, que es casi ideal para celdas solares, el beneficio total no puede ser explotado debido a la brecha de banda prohibida del CdS ($E_g = 2.42$ eV), ya que la mayoría de los fotones azules son absorbidos por el CdS y esencialmente, no contribuyen a la generación de fotocorriente [3]. Por lo tanto, sin reemplazar completamente el CdS, su brecha de banda prohibida necesita ser ampliada mediante dopajes, para permitir que más fotones sean absorbidos en el CdTe y mejorar la fotocorriente.

Estudios teóricos sobre dopaje de CdS con Zinc (Zn) muestran que el Zn mejora considerablemente las propiedades ópticas, incrementando el valor de brecha prohibida de 2.42 eV hasta 3.3 eV. El zinc es un elemento entre los metales de transición con radio iónico 0.074 nm mientras que para Cd es 0.097 nm que es mucho más pequeño que Cd^{+2} y como consecuencia Zn^{+2} puede penetrar fácilmente en la red de CdS en sustitución [4]. Se ha reportado que el dopaje con Zinc puede disminuir la resistencia eléctrica del CdS de $3 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ hasta $5 \times 10^2 \Omega \text{cm}$, compactar la red, modificando la relación de los parámetros de red a/c de 1.633 hasta 1.629 y ampliar el valor de brecha prohibida hasta 2.6 eV [5]. En 2017 Yong Zhang et al. [6] reportaron la formación del compuesto ternario CdZnS a partir del dopaje de películas de CdS depositadas por electrodeposición, mediante una solución de alta concentración de $Zn(NO_3)_2$.

La estructura de un dispositivo típico de CdS/CdTe es mostrado en la figura 1(a) y su diagrama de bandas es presentado en la Figura 1(b).

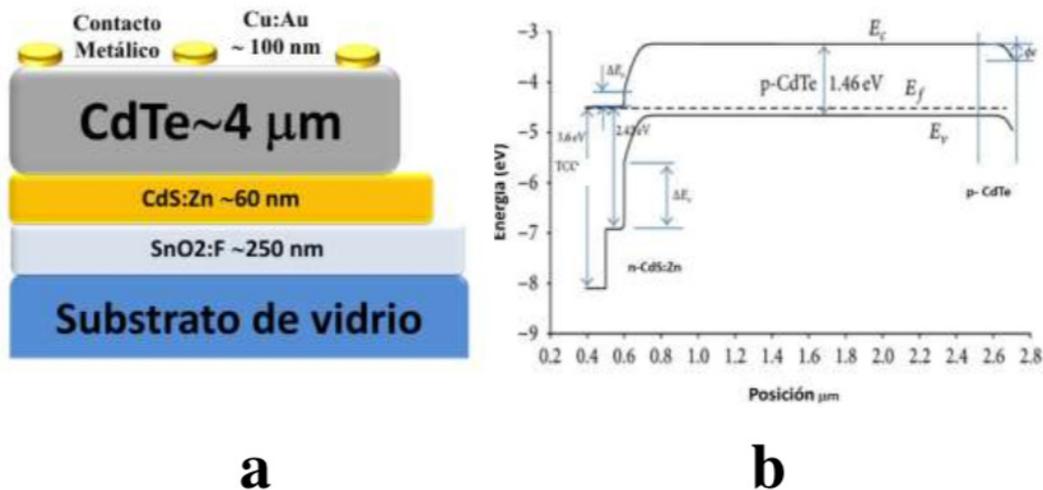


Fig. 1 a) Esquema típico de una celda solar CdS/CdTe b) Diagrama de bandas de una celda solar CdS/CdTe

En este trabajo se estudiaron la modificación de algunas propiedades de películas delgadas de CdS dopadas insitu (durante el mismo experimento) con una solución de Zn adicionando diferentes volúmenes.

2. Metodología

Se depositaron películas delgadas de CdS por la técnica de baño químico con soluciones precursoras de NH_4Cl (0.2) M, CdCl_2 (0.12) M, NH_3 (2M) y $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ (0.3) M en sustratos de vidrio con óxido conductor transparente $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO) a una temperatura de 75 °C durante 6 minutos. Se realizaron dopajes en el mismo experimento de depósito a partir de una solución de ZnCl_2 1M usando 0.1, 0.5 y 1 ml respectivamente. Después del depósito todas las muestras fueron tratadas térmicamente en una atmósfera de aire a 450°C por una hora.

Las propiedades estructurales fueron analizadas usando la técnica de difracción por rayos X en la modalidad haz rasante (0.5°) con un sistema Bruker D8 Advance usando la línea CuK. Análisis de espectroscopía RAMAN fueron hechos usando un microscopio Raman Thermo Scientific con un láser de argón de 514.5nm.

El análisis de morfología se llevó a cabo utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) Auriga- Zeiss con un voltaje de aceleración de 5 kV para la toma de imágenes, y 10 kV para el análisis elemental (EDXS). Las propiedades ópticas fueron medidas usando un Espectrofotómetro Shimadzu UV 2401 PC.

3. Resultados

En la figura 2 se muestran los difractogramas obtenidos de las películas delgadas de CdS, donde se observa su fase hexagonal con planos cristalinos que fueron identificados de acuerdo a la carta PDF 41-1049, cuyas posiciones se encuentran indicadas en el gráfico como líneas rojas; de la misma manera, se puede identificar la formación de óxido de cadmio cuyos planos cristalinos y posiciones de Bragg fueron asociadas de acuerdo a la carta PDF 05-0640 e identificadas de color azul.

La figura 2a corresponde a las películas de CdS sin dopar, la figura 2b (CdS:Zn 0.1) corresponde a las películas de CdS dopadas con 0.1 ml de solución 1M de ZnCl_2 . En la figura 2c (CdS:Zn 0.5) corresponde a las películas de CdS dopadas con 0.5 ml de solución donde se puede observar la disminución de intensidad del plano (111) correspondiente a la formación de CdO en la superficie de las películas y la aparición del plano (100) de ZnO (ver Fig. 3), finalmente , la figura 2d (CdS:Zn 1) corresponde a las películas de CdS dopadas con 1 ml de solución donde se puede observar la mejor definición del plano (101) de la estructura hexagonal del CdS.

En la Figura 3 se muestra el espectro de difracción en el rango de 30o a 35o para 2θ , donde se puede observar la aparición de un pico asociado a la formación de ZnO. De acuerdo a la carta PDF 65-3411n en 31.77° aparece la reflexión del plano (100) de la estructura hexagonal del ZnO. Esta formación de óxido puede deberse a la incorporación de Zn en la superficie de las películas obtenidas.

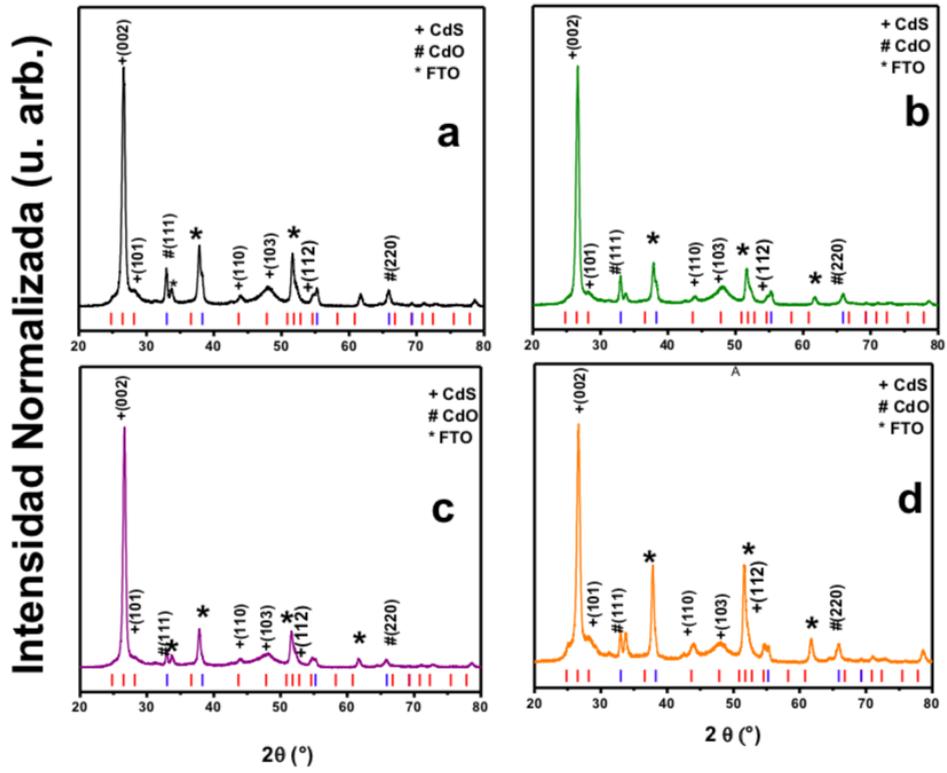


Fig. 2 Difractogramas obtenidos de a) CdS:Zn sin dopar b) CdS:Zn 0.1 c) CdS:Zn 0.5 y d) CdS:Zn 1

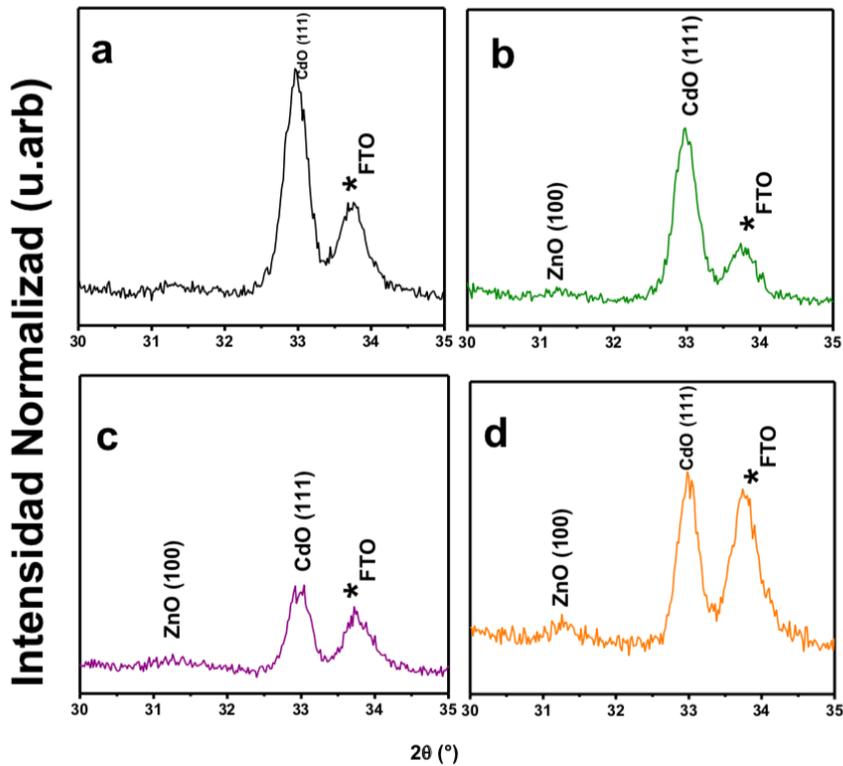


Fig. 3 Difractogramas obtenidos en el rango 30-35° en 2θ de a) CdS:Zn sin dopar b) CdS:Zn 0.1 c) CdS:Zn 0.5 y d) CdS:Zn 1

Los parámetros “a” y “c” fueron calculados de acuerdo a la forma del sistema hexagonal como sigue:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 1, la pequeña deformación de los parámetros de red de las películas CdS:Zn puede deberse a la incorporación de Zn en la red debido a la diferencia entre los radios iónicos de Zn y Cd, sugiriendo así la incorporación de Zn en sitios de Cd en la red de CdS.

TABLA 1 PARÁMETROS DE RED DE LAS PELÍCULAS DE CdS OBTENIDAS

Muestra	Ángulo 2θ (002)	d	a	c
		Amstrongs		
CdS Sin dopar	26.74	3.330	4.079	6.661
CdS:Zn 0.1	26.64	3.343	4.094	6.686
CdS:Zn 0.5	26.64	3.343	4.094	6.686
CdS:Zn 1	26.65	3.341	4.091	6.682

La figura 4 muestra los espectros Raman de las películas obtenidas. Todas las muestras presentan la vibración longitudinal (LO) característica del CdS alrededor de los 300 cm⁻¹; sin embargo, esta se ve modificada con el contenido de Zn en la red.

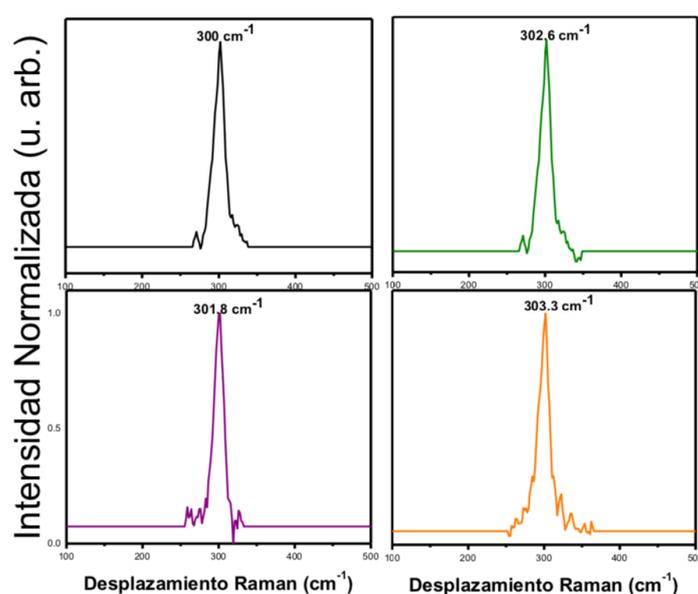


Fig. 4 Espectros Raman obtenidos de a) CdS sin dopar y CdS:Zn b) 0.1ml, c) 0.5 ml d) 1ml

La Figura 5 muestra las imágenes de MEB tomadas de películas delgadas de CdS sin tratamiento térmico (TT) y sin dopar (5a), CdS con TT en aire y sin dopar (5b); las muestras de CdS con los diferentes dopajes con mostradas en las Figs. (5c) CdS:Zn 0.1 ml, (5d) CdS:Zn 0.5 ml y (5e) CdS:Zn 1ml respectivamente; los tratamientos térmicos dejan sobre la superficie la formación de cristales, que corresponden al Óxido de Cadmio (CdO) y ZnO; mismos que se pueden apreciar mejor en las figuras 5b₁, 5c₁, 5d₁ y 5e₁. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la difracción de Rayos-x, pues hay fases referidas al CdO y ZnO respectivamente.

Se realizó un análisis elemental de las muestras obtenidas, se observa que las muestras sin dopar y con un dopaje de 0.1ml no contienen Zn, mientras que en las muestras dopadas con 0.5 y 1ml se observa un porcentaje de 1 y 2%, respectivamente, de Zn en las muestras, aunque cabe mencionar que estos porcentajes están dentro del error experimental del equipo (5%), sin embargo, hay una tendencia clara entre el aumento de volumen al realizar el dopaje y la cantidad de Zn encontrada en las muestras. Estos resultados se presentan a continuación en la tabla 2.

TABLA 2 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS PELÍCULAS CdS y CdS:Zn OBTENIDAS

Muestra	% Atómico (+/- 3%)			%Atómico	
	Matriz			Granos superficiales (+/-3%)	
	Cd	S	Zn	Cd	O
CdS sin dopar	55	45	0	52	48
CdS:Zn 0.1ml	56	44	Indetectable	51	49
CdS:Zn 0.5ml	54	45	1	44	56
CdS:Zn 1ml	53	45	2	45	55

De la misma forma se llevó a cabo un análisis elemental de forma puntual sobre los cristales observados en las imágenes de MEB que sobresalen de la superficie, para determinar la composición química de los mismos, estos resultados se muestran a continuación en la tabla 3. En estas mediciones no se detectó Sn, por lo que se determinó que los cristales obtenidos corresponden a la formación de óxido de cadmio derivada del tratamiento térmico al que las películas son sometidas.

En la tabla 3 se reportan las propiedades eléctricas de las películas depositadas, como se observa, el dopaje disminuye resistencia laminar, posiblemente debido a que, se producen cristales de ZnO y CdO en la superficie, ambos reportados como óxidos conductores, que reducen la resistencia de las películas obtenidas.

TABLA 3 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Muestra	R Ω/\square 10^6	ρ $\Omega \text{ cm}$ 10^1	Espesor (nm) +/- 10 nm
CdS sin dopar	140	60	60
CdS:Zn 0.1 ml	1.9	1.7	60
CdSZn 0.5 ml	1.2	1.2	60
CdS:Zn 1 ml	3.1	1.8	60

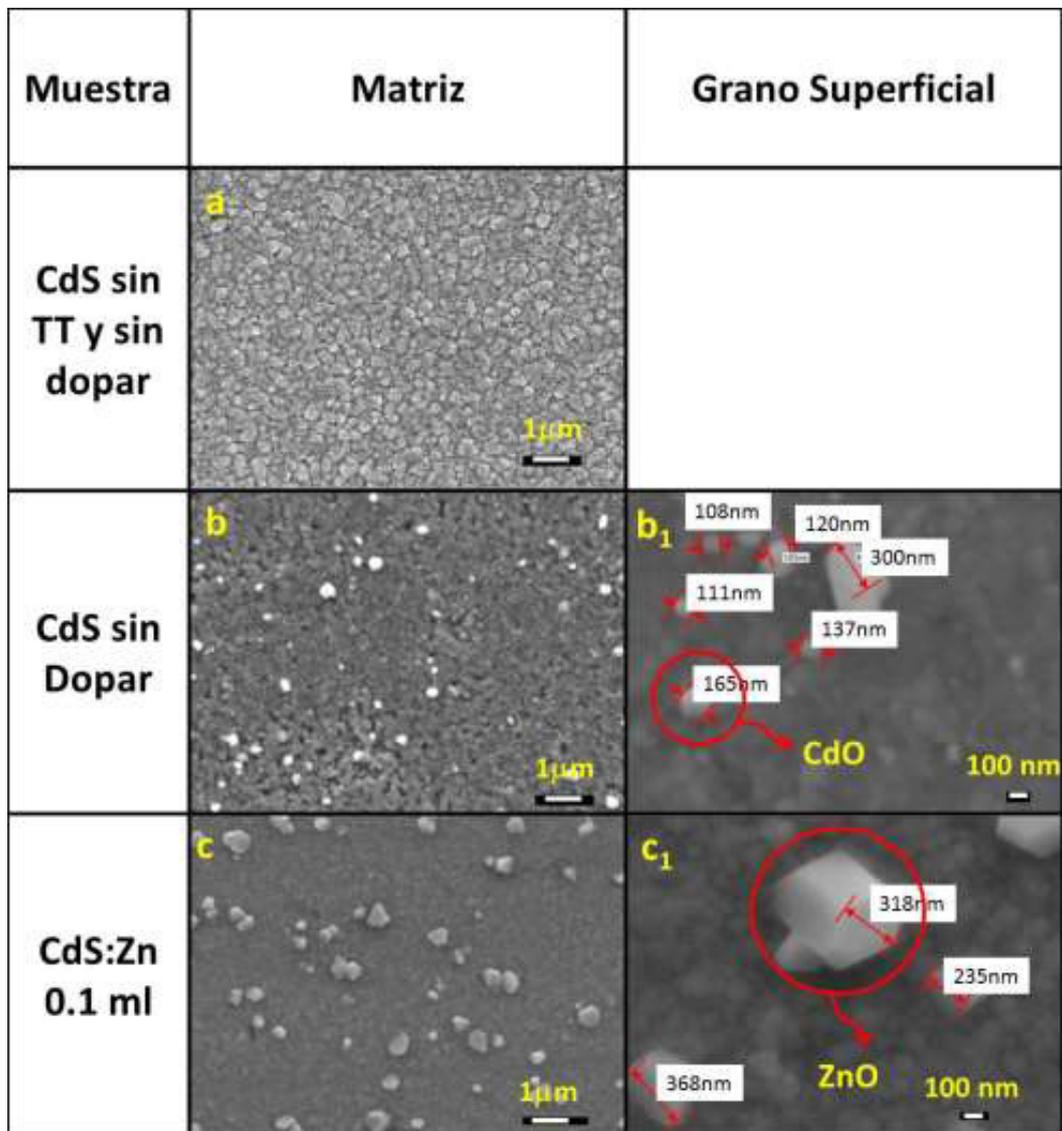
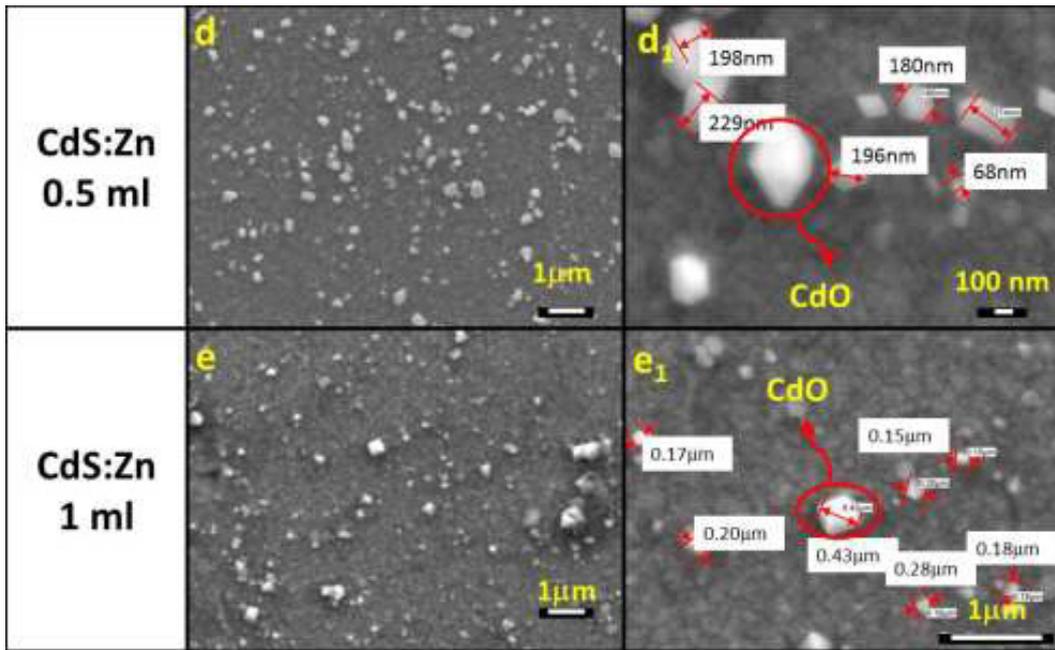


Fig. 5 Imágenes MEB de películas delgadas de a) CdS Sin tratamiento térmico b) CdS sin dopar c) CdS: Zn 0.1 d) CdS: Zn 0.5 e) CdS: Zn 1



En la Figura 6 se muestra el espectro de transmitancia obtenido para las películas de CdS y CdS:Zn, se observa que la película sin dopar presenta una transmitancia menor al 60% en la región visible, mientras que en aquellas películas dopadas con Zn este valor incrementa hasta 67% incrementando este valor conforme el dopaje aumenta.

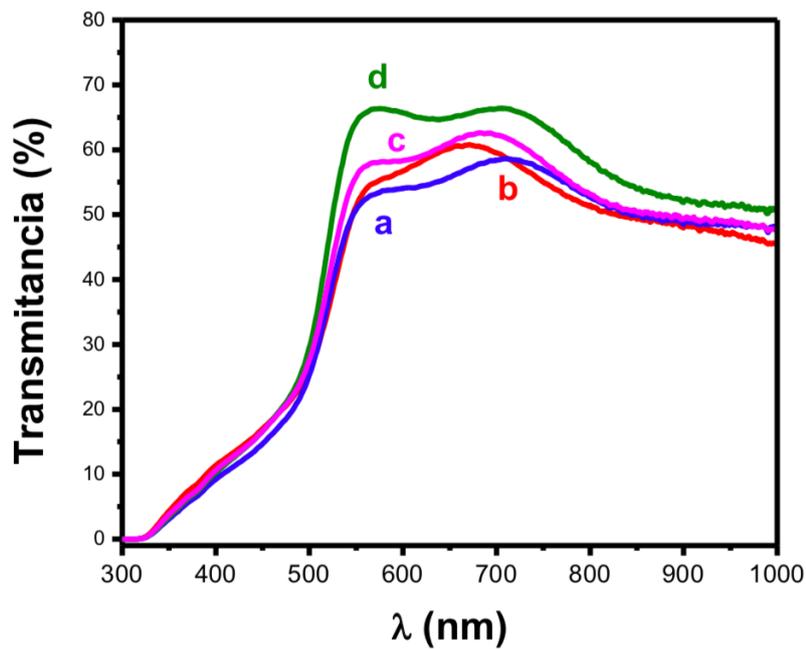


Fig. 6 Espectro de Transmitancia obtenido de las películas a) CdS sin dopar b) CdS:Zn 0.1 c) CdS:Zn 0.5 y d) CdS:Zn 1

La Figura 7 muestra un ajuste experimental de los espectros de transmitancia obtenidos en la Figura 6; dicho ajuste se hizo utilizando el coeficiente de absorción óptica de acuerdo a la ecuación de Lambert-Beer y, considerando una brecha de banda prohibida del tipo directa. Se observa que el valor de brecha prohibida va aumentando conforme el dopaje en volumen aumenta.

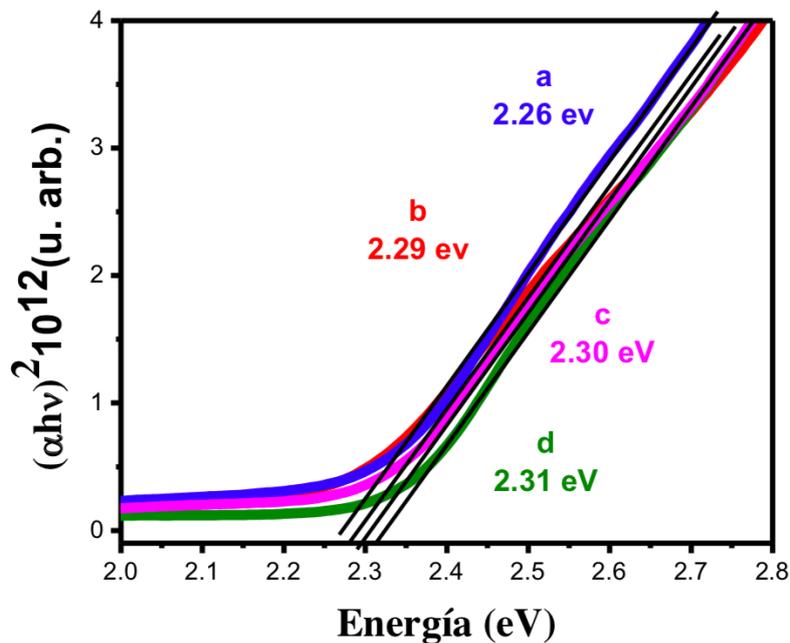


Fig. 7 Ajuste experimental $(\alpha h\nu)^2$ de a) CdS sin dopar b) CdS:Zn 0.1 c) CdS:Zn 0.5 y d) CdS:Zn 1

4. Conclusiones

Se obtuvieron películas delgadas de Sulfuro de Cadmio por la técnica de baño químico. Algunas de estas películas fueron dopadas con Zn en el mismo experimento de depósito a partir de soluciones de Cloruro de Zn. Los resultados de difracción de rayos X revelan la formación de CdO y ZnO debido a la incorporación del Zn y tratamientos térmicos en aire. Los valores de los parámetros de red a y c aumentaron con la incorporación del Zn en la red; el radio iónico del Cd es de 0.097 nm y para el Zn de 0.074 nm, lo cual infiere que el Zn ocupó sitios de Cd en la red; este resultado se ve reflejado en los espectros RAMAN pues la red no se ve deformada. Por otro lado, el valor de E_g aumenta con la incorporación de Zn en la red, así mismo las muestras de CdS son menos resistivas con la incorporación del Zn.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por los proyectos CeMIE-Sol P25, SIP 20180398 y 20180439.

6. Referencias

- [1] K. L. Chopra, P. D. Paulson and V. Dutta "Thin-Film Solar Cells: An Overview" *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004; 12:69–92 (DOI:10.1002/pip.541)
- [2] A. Bosio, G. Rosa, N. Romeo "Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells" *Solar Energy* 175 (2018) 31-43.
- [3] Giray Kartopu, Andrew J. Clayton, William S.M. Brooks, Simon D. Hodgson, Vincent Barrioz, Alban Maertens, Dan A. Lamb and Stuart J.C. Irvine. "Effect of window layer composition in Cd_{1-x}Zn_xS/CdTe solar cells" *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2014; 22:18–23. DOI:10.1002/pip.2272
- [4] M Junaid Iqbal Khan, M Nauman Usmani and Zarfishan Kanwal. "Novel optical properties of CdS:Zn rocksalt system (a theoretical study)" *Mater. Res. Express* 4 (2017) 115901. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa93c4>
- [5] M. Anbarasi, V.S. Nagarethinam, A.R. Balu. "Investigations on the structural, morphological, optical and electrical properties of undoped and nanosized Zn-doped CdS thin films prepared by a simplified spray technique" *Materials Science-Poland*, 32(4), 2014, pp. 652-660. DOI: 10.2478/s13536-014-0244-7
- [6] Yong Zhang, Hongmin Ma, Dan Wu, Rongxia Li, Xueping Wang, Yaoguang Wang, Wenjuan Zhu, Qin Wei, Bin Du. "A generalized in situ electrodeposition of Zn doped CdS-based photoelectrochemical strategy for the detection of two metal ions on the same sensing platform". *Biosensors and Bioelectronics* 77 (2016) 936–941. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2015.10.074>

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE TiO_2 DOPADO CON TIERRAS RARAS

PROPUESTA DE CATALIZADOR FOTOSENSIBLE

Mariana Zamora-Delgado^a, Carlos A. Pineda-Arellano^b.

Licenciatura de Ingeniería en Energía-Universidad Politécnica de Aguascalientes.

Calle Paseo, San Gerardo, 207, 20342 Aguascalientes, Ags.

zamoramzd@gmail.com

CONACYT-Centro de Investigaciones en Óptica, A.C-Unidad Aguascalientes. Prolongación Constitución, 607,

Fraccionamiento Reserva Loma Bonita, 20200 Aguascalientes, Ags.

Resumen: Algunas de las tecnologías más prometedoras para tratar problemas relacionados con el tratamiento de aguas residuales son los llamados Procesos Avanzados de Oxidación (AOPs, por sus siglas en inglés). Estos AOPs se vuelven más efectivos cuando se implementa la participación de semiconductores, como el dióxido de titanio (TiO_2), popularmente usado por sus propiedades como baja selectividad, toxicidad y costo, además de su excelente respuesta en respuesta de la luz ultravioleta. En este trabajo se empleó el método de síntesis por la vía sol-gel, el cual permitió llevar a cabo el dopaje del TiO_2 con iones de tierras raras (RE, por sus siglas en inglés), de Cerio, Europio e Iterbio a un porcentaje atómico de 0.5%at y 1 %at. con el fin de estudiar y mejorar su fotorespuesta en longitudes de onda de luz visible. Para evaluar el desempeño de los materiales sintetizados se llevaron a cabo degradaciones de colorante azul de metileno Karal® a 100ppm en una celda fotoelectroquímica. Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el proceso de fotocatalisis heterogénea puede ser útil en el tratamiento de aguas residuales con presencia de colorantes, así como la mejora en la fotorespuesta de los fotoánodos de TiO_2 .

Palabras clave: AOPs, residuales, fotocatalisis, fotoelectroquímica, tierras raras.

1. Introducción

El tratamiento de agua contaminada en la actualidad representa un serio compromiso ante la creciente demanda de dicho recurso, esto, debido principalmente al aumento desenfrenado de la población. Una de las principales causas de la contaminación del recurso hídrico son las descargas industriales, así como el uso excesivo de pesticidas, fertilizantes y los desechos sólidos urbanos. Los métodos de pretra-

tamiento tales como la coagulación, la floculación y la sedimentación, pueden eliminar un máximo de 90% de las bacterias, el 70% de los virus y el 90% de los protozoos, sin embargo, aún con el filtrado no es una vía por completo segura de purificación de agua [1].

Adicionalmente, las técnicas con mayor aplicación incluyen la cloración (cloro y derivados), la ozonización y la irradiación UVC (280 – 100 nm) [2]. Una forma de emplear la irradiación UV es mediante la fotocatalisis heterogénea, la cual se define como la aceleración de una fotorreacción en presencia de un catalizador, esto indica que tanto la luz como un catalizador son necesarios para poder acelerar una transformación química [3]. Además, este es un proceso no selectivo facilitando la aplicación ante contaminantes complejos, en donde, es muy común que el dióxido de titanio (TiO_2) funja como catalizador durante el proceso. De manera general, las aplicaciones de la fotocatalisis heterogénea incluyen también la oxidación de compuestos orgánicos, eliminación de efluentes en aguas residuales, entre otras aplicaciones para erradicar algunas bacterias o virus. Existe bibliografía que detalla con precisión cuales son algunas de estas variantes [4].

Los Procesos Avanzados de Oxidación (AOPs) se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) en cantidad suficiente para interactuar con los contaminantes orgánicos del medio” [2]. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales ($\text{OH}\cdot$) y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan. Los más comunes utilizan combinaciones con ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radiación ultravioleta y fotocatalisis. Estos procesos se pueden llevar a cabo en un medio homogéneo o heterogéneo y podrían requerir energía externa o no para su ejecución.

El principio de funcionamiento en los óxidos semiconductores se basa en la absorción de fotones con energía que sea igual o supere el valor al de la banda prohibida (BG) del semiconductor empleado, así, de esta forma los electrones son promovidos desde la banda de valencia (BV) hasta la banda de conducción (BC), generando pares electrón/hueco los cuales desempeñan un papel relevante en la fotocatalisis al momento de su recombinación [5]. En este trabajo se presentan los resultados más relevantes de la evaluación de la fotocatalisis usando fotoánodos de TiO_2 dopados con Cerio, Europio e Iterbio a un porcentaje atómico de 0.5%at y 1 %at. esto con el fin de estudiar y mejorar su fotorespuesta en longitudes de onda de luz visible.

1.2. Fotocatalisis heterogénea

Se marcó el inicio en la fotocatalisis heterogénea cuando Fujishima y Honda (1972) [6] descubrieron la división fotocatalítica de la molécula del agua en electrodos de TiO_2 en un dispositivo llamado celda fotoelectroquímica. Desde entonces generó un interés enfocado a la oxidación de compuestos orgánicos, eliminación de contaminantes en aguas residuales, entre otras aplicaciones para erradicar algunas bacterias, o virus. Existe bibliografía que detalla con precisión cuales son algunas de estas variantes [4].

Las reacciones que se dan a lugar en la fotocatalisis heterogénea se pueden enumeran en cinco etapas [7]:

1. Difusión de las moléculas de los reactivos hasta la superficie del sólido.
2. Adsorción de al menos una de las especies reactivas sobre la superficie.

3. Reacción química entre uno o varios de los reactivos adsorbidos y moléculas en fase fluida que chocan con la superficie.
4. Desorción de los productos de la superficie.
5. Difusión de los productos hacia la fase fluida.

En la fotocatalisis heterogénea los catalizadores con mayor aplicación son los semiconductores dopados, a los cuales se le añade a su red cristalina un pequeño porcentaje de impurezas para mejorar sus propiedades eléctricas.

La propiedad fotocatalítica del TiO₂ se debe a su amplio intervalo de banda (3.2 eV) y la larga vida útil de los pares h⁺/e⁻ fotogenerados. Sin embargo, el alto grado de recombinación de los electrones fotogenerados y huecos es un factor limitante importante que controla la eficiencia fotocatalítica e impide la aplicación práctica de esta técnica en la degradación de contaminantes en el agua y el aire. Esto representa un desafío en la fotocatalisis heterogénea para aumentar la eficiencia de separación de carga de los fotocatalizadores [8].

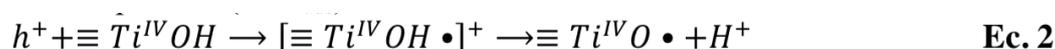
1.3. Mecanismo fundamental de la fotocatalisis usando TiO₂

Los semiconductores tales como el dióxido de titanio se caracterizan por tener una banda de conducción (BC) vacía y una banda de valencia (BV) llena. Cuando la banda de valencia recibe un fotón con mayor energía que la banda prohibida (BG), un electrón excitado es promovido a la banda de conducción, el cual deja un hueco (h⁺) en la banda de valencia. Los pares (e⁻/h⁺) fotogenerados migrarán posteriormente a la superficie del fotocatalizador y serán sometidos a una serie de reacciones para producir especies oxidativas reactivas (ROS, por sus siglas en inglés) [2].

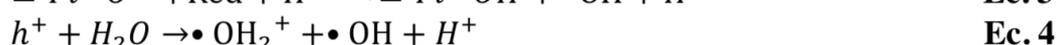
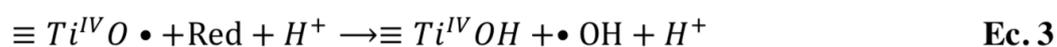
Para el TiO₂, la longitud de onda de la luz para el cumplimiento del proceso de excitación está restringida a la región del UV (360 a 400 nm) debido a su amplia brecha de banda (3.2 eV).



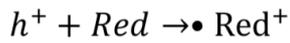
En la banda de valencia, el h⁺ separado migra a la superficie y se atrapa por los grupos hidroxilo adsorbidos en la superficie o agua para producir huecos atrapados ($\equiv Ti^{IV}O\bullet$) (Ec. 2), el cual generalmente se describe como un radical hidroxilo unido a la superficie ($\bullet OH_{ads}$).



Cuando los donantes de electrones (Red) están disponibles en la superficie del TiO₂, el proceso de oxidación fotocatalítica se realiza mediante la transferencia de Res a los huecos atrapados (Ec. 3). Posteriormente, la liberación de $\bullet OH_{ads}$ lleva a la formación de radicales hidroxilos en masa ($\bullet OH_{bulk}$) que contribuyen al proceso de oxidación. (Ec. 4, 5 y 6).



Por otro lado, los h^+ también pueden estar directamente involucrados en la oxidación de Red e indirectamente relacionados con la producción de H_2O_2 mediante el acoplamiento de dos $\bullet OH$. (Ec. 7 y 8)



Ec. 7



Ec. 8

En la banda de conducción, el O_2 actúa normalmente como el receptor de electrones para atrapar el e-fotoexcitado en sistemas aireados previniendo así la recombinación de los pares e^-/h^+ . En este proceso, el $\bullet OH^-$ sufre una variedad de reacciones para producir H_2O_2 . (Ec. 9, 10, 11 y 12) Mientras que el H_2O_2 generado, a su vez puede producir el $\bullet OH$ altamente reactivo por su reducción [2].

El uso de ánodos con dióxido de Titanio como fotocatalizador para su aplicación como un método de tratamiento de aguas presenta una serie de ventajas que se le atribuyen al material base (TiO_2) que incluyen la operación en condiciones ambientales, el catalizador por sí mismo es de bajo costo con disponibilidad comercial, no es tóxico y fotoquímicamente estable [9]. Por otro lado, una desventaja que presenta el desarrollo de los nuevos materiales, gira en torno a los elementos empleados para el dopaje, pues son de un costo mayor. Este método de tratamiento para aguas residuales presenta una serie de ventajas y desventajas que giran en torno a su método de funcionamiento, así como el material empleado. La figura 1 ilustra el comportamiento descrito en las ecuaciones anteriores [10].

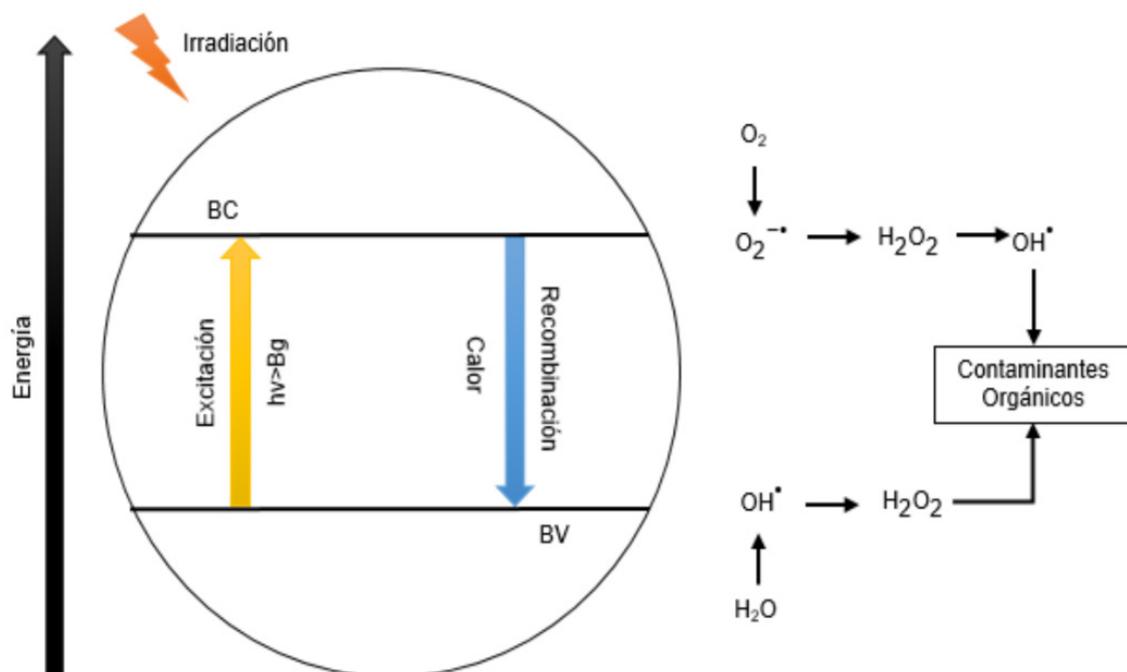


Figura 1. Diagrama que muestra el mecanismo general de la oxidación fotocatalítica empleando TiO_2 . Fuente: Propia.

1.4. TiO₂ dopado con tierras raras (RE)

Las nanopartículas de TiO₂ presentan varias ventajas para las aplicaciones en comparación con algunos equivalentes en la categoría de semiconductores, por su alta relación superficie/volumen, transporte de carga ($\approx 0.1-1.0 \text{ cm}^2/\text{VS}$) y vida útil, gracias a su anisotropía dimensional, permite una contribución eficiente a la separación de los huecos y electrones fotogenerados. La síntesis por sol-gel es el método más común para la preparación de nanopartículas de TiO₂ dopadas con RE, ya que es un procedimiento simple, rentable y de baja temperatura, con la capacidad de fabricar nanoestructuras con alta pureza, homogeneidad y morfología controlable.

Las propiedades de este material dependen en gran medida de su estructura cristalina, química de la superficie, dopantes, niveles de dopaje, etc. Para poder manipular estas características se han desarrollado diferentes técnicas de síntesis [11]. Al dopar el TiO₂ con iones ópticamente activos, se puede producir luz visible mediante luminiscencia de conversión ascendente o descendente. La luminiscencia visible (Vis) y ultravioleta (UV) de varios iones RE³⁺ se puede obtener cuando se incorpora a la anatasa TiO₂, afectando también a las características microestructurales de TiO₂ [12]. Además, la incorporación de iones lantánidos en una matriz de TiO₂ podría proporcionar un medio para concentrarse en el contaminante orgánico en la superficie del semiconductor y, por lo tanto, mejorar la fotoactividad del TiO₂ [13-14].

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó el método de síntesis vía sol-gel, el cual, durante el proceso implica una transición de un sistema líquido, llamado “sol” (suspensión coloidal de partículas sólidas con tamaño nanométrico que está en esta condición gracias al movimiento Browniano), a una fase denominada “gel” (sólido constituido por al menos dos fases, con la fase líquida atrapada e inmobilizada por la fase sólida).

Las reacciones más importantes que ocurren en el seno del sistema, durante la formación del sol y su transición a gel, son la hidrólisis y condensación. Así, se obtienen los materiales dopados con elemento de RE como el Cerio (Ce), Europio (Eu) e Iterbio (Yb) a un porcentaje de 0.5%at y 1%at, obtenidos a partir de las sales de Cerium (III) nitratehexahydrate, Europium (III) nitratepentahydrate e Ytterbium (III) nitratepentahydrate, respectivamente, además de reactivos como el isopropóxido de Titanio, ácido clorhídrico agua desionizada y etanol Posteriormente se procedió a elaborar fotoánodos sobre sustratos de vidrio con cubierta conductora de FTO (Fluorine doped Tin Oxide), haciendo depósitos de películas delgadas por dip-coating con los diversos materiales, con un total de 10 películas delgadas, tratadas cada una con tratamiento térmico durante 30 minutos a 100°C. Añadido a esto, se llevó a cabo un último tratamiento térmico a alta temperatura (450°C) durante 5 horas. El diagrama presentado a continuación ilustra las etapas que siguieron para poder obtener los fotoánodos.

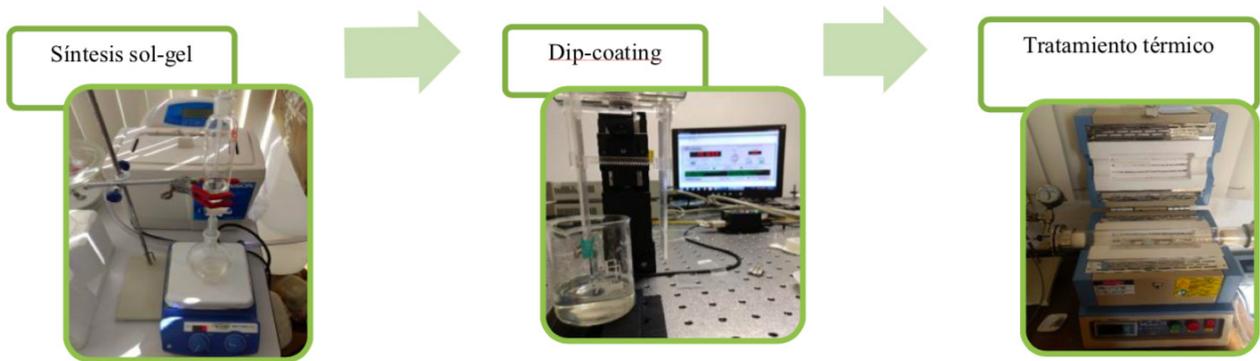


Figura 2. Diagrama de preparación de fotoánodos de TiO_2 : RE. Fuente: Propia

3. Resultados y Análisis de resultados

3.1 Caracterización de materiales

Los fotoánodos obtenidos se sometieron a diferentes técnicas de caracterización, tales como microscopía electrónica de barrido, análisis de composición elemental (EDS), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia Raman y técnicas electroquímicas de fotorespuesta. Dicha caracterización, además de ilustrar la topografía de las películas delgadas, permitió determinar la presencia de fase anatasa y rutilo (de acuerdo a la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción, ICDD, por sus siglas en inglés) en los difractogramas proporcionados por los análisis de DRX y espectros Raman tal como se ilustra en la figura 3 y 4, respectivamente, para todos los materiales sintetizados. De igual forma, en las figuras 5 y 6 se muestran los espectros Raman generados para dos zonas distintas en la superficie de los fotoánodos de TiO_2 :1% Ce y TiO_2 :0.5%Ce, en donde presencia un cambio de fase anatasa a rutilo. En la figura 3 y 4 se puede observar la presencia de la fase anatasa para todos los casos de los materiales sintetizados, esto es de especial importancia ya que la anatasa es un referente en la fotocatalisis heterogénea y su fotoactividad ha sido reportada en un gran número de trabajos.

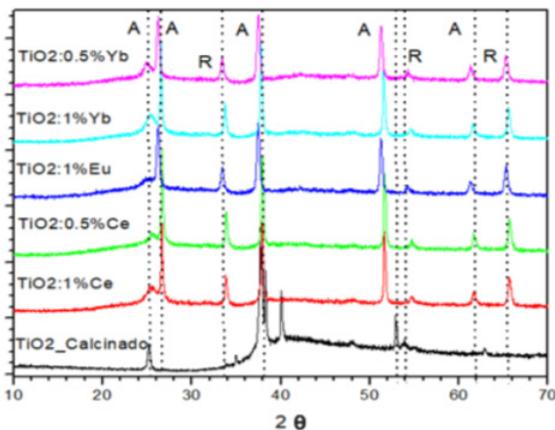


Figura 3. Difractograma de TiO_2 dopado con tierras raras
Fuente: Propia

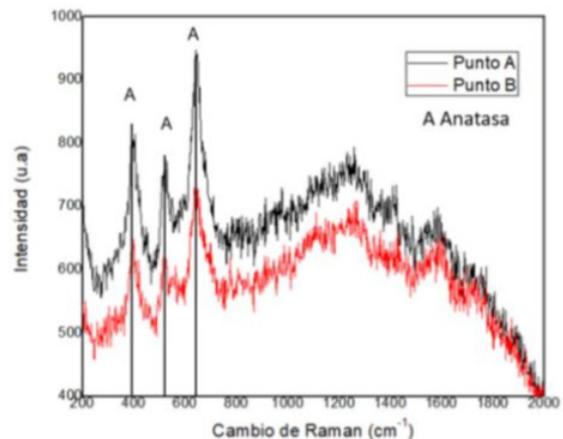


Figura 4. Espectro Raman de película delgada de TiO_2 sin dopar
Fuente: Propia

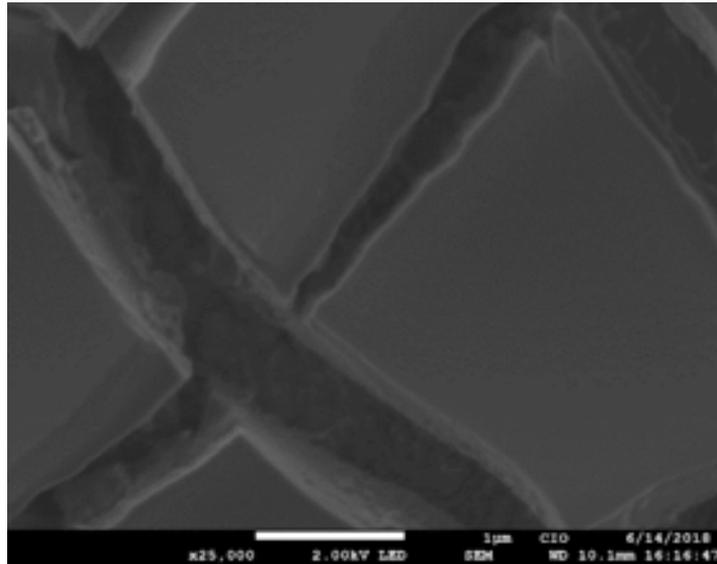


Figura 5. SEM de TiO₂. Fuente: Propia. Nota: con magnificación de x25,000.

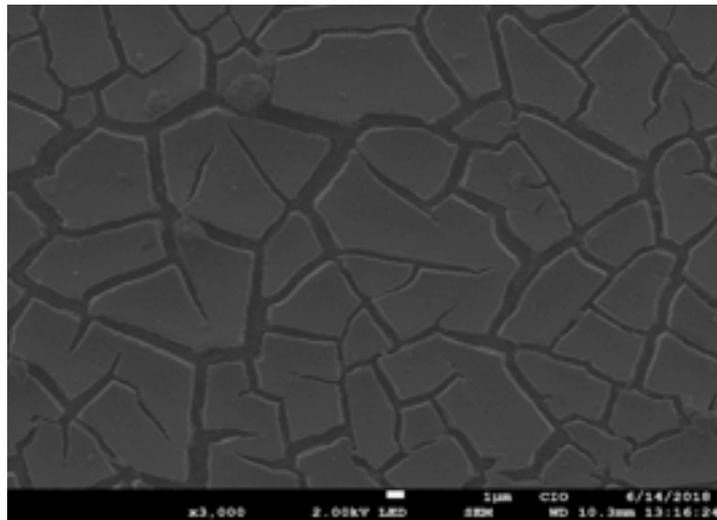


Figura 6. SEM de TiO₂: 1%Eu Fuente: Propia. Nota: con magnificación x3,000.

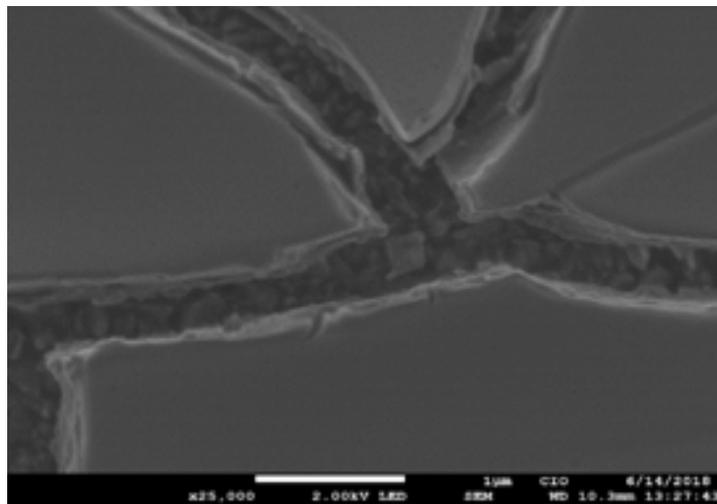


Figura 7. SEM de TiO₂: 0.5%Eu. Fuente: Propia. Nota: con magnificación x25,000.

Utilizando un microscopio electrónico de barrido de emisión Schottky Fiel, JMS 7800F de JEOL® se obtuvieron las distintas imágenes superficiales de los fotoánodos, como se ilustra en la figura 5 para el caso del TiO_2 sin dopar, y 6 y 7 para el dióxido de titanio dopado con Europio al 1%at y 0.5%at respectivamente. Todos los fotoánodos caracterizados presentaron grietas, las cuales se formaron durante los tratamientos térmicos.

Posteriormente con las técnicas electroquímicas de voltametría lineal de barrido (LSV) y cronamperometría se observó la fotorespuesta de los fotoánodos de dióxido de titanio dopado con RE como electrodo de trabajo y así obtener más información respecto a la variación de la fotocorriente por la fotoactividad de los fotoánodos.

Se empleó un potenciostato SP-150 Biologic®, el cual suministraba los diferenciales de potencial, hasta 0.2 V como mayor tolerancia de los materiales; un electrodo de Calomel Saturado (SCE) como electrodo de referencia (RE), una malla de platino como contra electrodo (CE), y los fotoánodos de vidrio conductor con los depósitos de los materiales sintetizados como electrodo de trabajo (WE), así como un depósito de vidrio Pyrex y ventana de cuarzo como celda electroquímica. La fuente de luz UV fue una lámpara XE 75W Newport® (180-2800 nm).

En las figuras 8 y 9 se observa el comportamiento esperado de los fotoánodos, pues la línea negra ilustra nula actividad de fotorespuesta, comparada con la línea roja generada al irradiar los fotoánodos con la lámpara. Se observa un incremento de alrededor de 20 mA/cm^2 para el caso del $\text{TiO}_2:0.5\%\text{Eu}$ y $\text{TiO}_2:0.5\%\text{Yb}$, estos resultados muestran la mejora en la fotorespesta del TiO_2 sin dopar evaluado bajo las mismas condiciones que los materiales dopados lo cual puede observarse en la figura 10 en el que se observa un comportamientamiento lineal y un ligero aumento en la evaluación de la corriente al momento de iluminar el fotoánodo de TiO_2 .

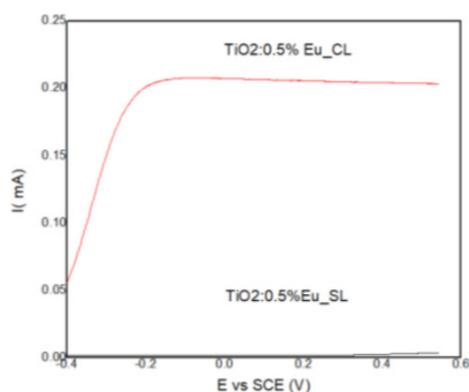


Figura 8. LSV en fotoánodo de $\text{TiO}_2:0.5\%\text{Eu}$. Fuente: Propia.

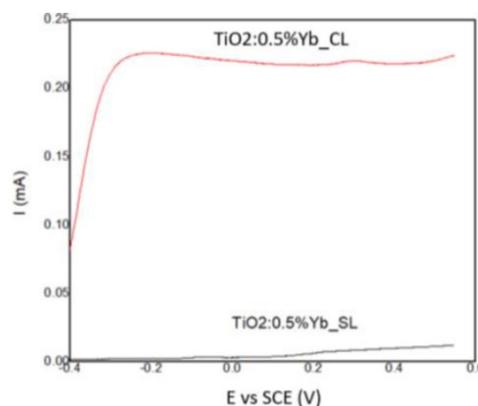


Figura 9. LSV en fotoánodo de $\text{TiO}_2:0.5\%\text{Yb}$. Fuente: Propia.

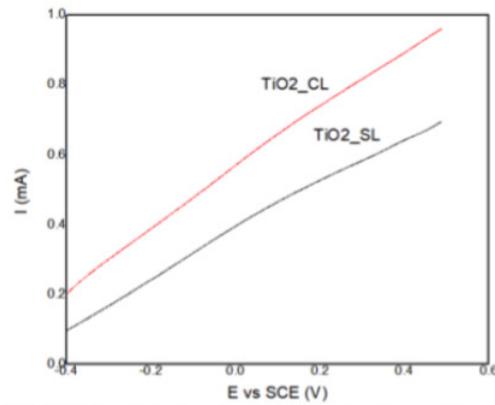


Figura 10. LSV en fotoánodo de TiO_2 sin dopar. Fuente propia

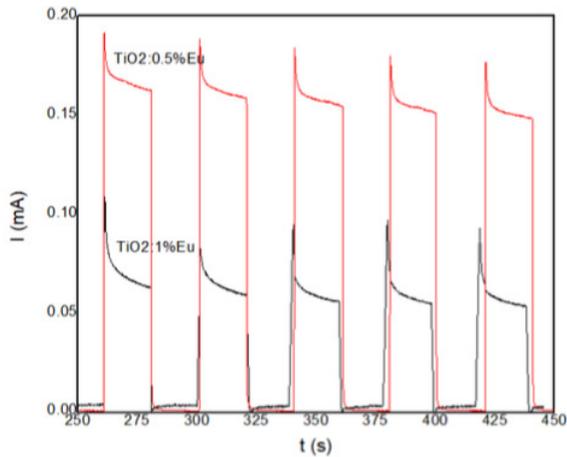


Figura 11. Cronoamperometría en fotoánodo de $\text{TiO}_2:\text{Eu}$.

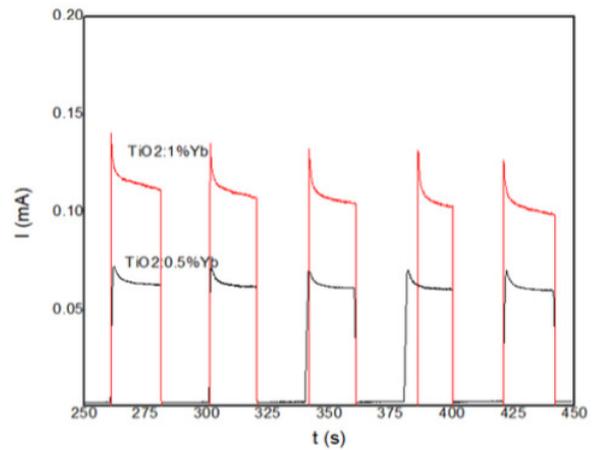


Figura 12. Cronoamperometría en fotoánodo de $\text{TiO}_2:\text{Yb}$.

En el caso de las pruebas con la técnica de cronoamperometría (en función del tiempo) se ilustra en la figura 11 y 12, que los materiales con mayor sensibilidad a la luz son los que cuentan con dopaje de Europio e Iterbio en comparación con el TiO_2 puro el cual muestra una fotocorriente mínima. Cabe hacer mención que todos los materiales sintetizados con dopantes de Eu y de Yb mostraron mayor fotorespuesta que el TiO_2 sin impurificar, sin embargo, no se muestran sus gráficas debido a la falta de espacio.

Tomando como referencia los resultados obtenidos mediante la técnica LSV y cronoamperometría, se observó que los fotoánodos de $\text{TiO}_2:0.5\% \text{Yb}$ y $\text{TiO}_2:0.5\% \text{Eu}$, presentaron mejores características para llevar a cabo fotocatalisis heterogenea la cual debe ser evaluada para corroborar los presentes resultados, por ello se determina que de manera experimental se pueden llevar a cabo degradación de contaminantes a futuro con estos dos materiales.

4. Conclusiones

El método de síntesis sol-gel facilitó la inclusión de iones de elementos de tierras raras como lo fue el Ce, Eu e Yb los cuales, según se ilustró en la caracterización mediante las diversas técnicas, modificaron

propiedades del dióxido de Titanio, las cuales en gran medida se pueden contemplar para estudiar los resultados que se pueden obtener a partir de futuras aplicaciones en fotocatalisis heterogénea, generando información de relevancia en lo que refiere en nuevos materiales fotocatalíticos.

Se propone optar por otro reactivo para hacer efectiva la fotocatalisis heterogénea pues según revisión bibliográfica [15], se reporta que los tintes pueden ser excitados por la irradiación de luz visible y en consecuencia, actúan como sensibilizadores inyectando electrones del colorante al fotocatalizador. Por lo tanto, esta transferencia de electrones podría destruir la distribución regular de enlaces dentro de la molécula del tinte, causando su decoloración más no su mineralización.

Cabe destacar que de las diversas técnicas de caracterización se obtuvieron resultados muy similares para el caso de los fotoánodos dopados con Europio e Iterbio pues su desempeño fue mejor comparado con el fotoánodo elaborado con TiO_2 y Cerio, pudiendo, de algún modo descartar este elemento para futuros estudios, centralizando el interés únicamente por las propiedades que se adquirieron durante la síntesis del dióxido de titanio dopado con Europio e Iterbio.

Si bien es sabido por la comunidad científica que los materiales de tierras raras son onerosos, existe una cantidad harta para darle seguimiento a su estudio, profundizando en sus propiedades ópticas, eléctricas y fotosensibles.

5. Referencias

- [1] Fernández Alba, A., Letón García, P., & Dorado Valiño, M. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid.
- [2] Zhao, H., Keung Wong, P., & Taicheng, A. (2017). *Advances in Photocatalytic Disinfection*. Springer.
- [3] Tobaldi, D., Pullar, R., Sever S' kapin, A., Seabra, M., & Labrincha, J. (2014). *Visible light activated photocatalytic behaviour of rare earth modified commercial TiO_2* . *Materials Research Bulletin*.
- [4] Foster, H., Iram, D., & Steele, A. (Junio de 2011). *Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity*. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-011-3213-7>
- [5] Hassan Hussein, F. (2011). *Advances in Treating Textile Effluent*. IntechOpen.
- [6] Fujishima A, Honda K. *Nature*, 1972, 238: 37
- [7] Borrego Pérez, J. (2017). *Desarrollo y caracterización de películas delgadas de TiO_2 dopadas con tierras raras (Er y Yb) por la técnica de sol-gel para aplicaciones fotocatalíticas*. Guadalajara.
- [8] H. Hidaka, Y. Asai, J. Zhao, K. Nohara, E. Pelizzetti, N. Serpone, *J. Phys. Chem.* 99 (1995) 8244.
- [9] Garcés Giraldo, L., Mejía Franco, E., & Santamaría Arango, J. (2004). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. *Lasallista de Investigación*, 1(1).
- [10] Herrmann, J.-M. (2010). *Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 461-468.
- [11] Pelizzetti, E., & Schiavello, M. (1990). *Progress in the applications of photochemical conversion and storage*. En *Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy*.
- [12] Wen, J., Li, X., Liu, W., Fang, Y., Xie, J., & Xu, Y. (2015). *Photocatalysis fundamentals and surface modification of TiO_2 nanomaterials*. *Chinese Journal of Catalysis*.
- [13] Đorđević, V., & Milićević, B. (2017). *Titanium Dioxide*. IntechOpen.
- [14] T. Nguyen-Phan, M. Bock Song, E. Jung Kim, E. Woo Shin, *Micropor. Mesopor. Mater.* 119 (2009) 290.
- [15] B. Liang, S. Mianxin, Z. Tianliang, Z. Xiaoyong, D. Qingqing, *J. Rare Earths* 27 (2000) 461.

MEDICIÓN DEL PERFIL DE TEMPERATURAS DE UNA ESTUFA SOLAR

TIPO CAJA EMPLEADA PARA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Rosalinda Najera Lerma ^a, Lázaro Canízales Dávalos ^a, Raúl Adrián Martínez Orozco ^a
e Hiram Hernández López [§]

^{§a} Maestría en Ciencia y Tecnología Química, Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Carr. Zacatecas - Guadalajara Km. 6 Col. Ejido "La Escondida", Zacatecas, Zacatecas, 98160, MÉXICO.

[§] hiram.hernandez.lopez@uaz.edu.mx

Resumen: Existen varios métodos para la extracción de aceites esenciales. La destilación por arrastre de vapor, es el proceso más utilizado, sin embargo tiene el inconveniente de requerir un alto consumo energético para realizar los procesos de calentamiento y enfriamiento. Por esta razón, se propone utilizar la energía solar como alternativa al proceso de calentamiento por energía eléctrica o el uso de derivados del petróleo, mediante el uso de una estufa solar, debido al desempeño térmico alcanzado. En el presente trabajo se muestra la construcción de un modelo de estufa solar tipo caja, así mismo el análisis térmico de la misma, en la cual contiene en su interior un sistema de destilación tradicional de cobre (Alambique). Las temperaturas alcanzadas fueron las deseables a pesar de las diferentes condiciones climáticas que se presentaron durante el desarrollo del proceso experimental. Se realizaron variaciones a los flujos de alimentación para determinar el volumen óptimo de agua que incrementa la producción de vapor, indispensable para la extracción de los aceites. Aún con este desempeño, es posible mejorar el comportamiento del sistema.

Palabras clave: Estufa Solar, temperaturas, energía térmica.

1. Introducción

Durante años y debido a sus propiedades biológicas, los aceites esenciales se han utilizado como un ingrediente para mejorar la funcionalidad de diversos productos [1]. Existen varios métodos para la extracción de aceites esenciales como: prensado, extracción con solventes volátiles, extracción con fluidos super críticos, enflorado y destilación por arrastre de vapor. La destilación por arrastre de vapor ha sido la forma más utilizada, aunque presenta un alto costo de operación por la gran cantidad de energía requerida. A nivel industrial representa el proceso más adecuado para la producción de aceites esenciales.

Por lo anterior, surge la necesidad de reemplazar las fuentes de energía convencionales por una fuente renovable [2].

Dentro de las energías renovables, la energía solar es una fuente prometedora y amigable con el ambiente, ya que su transformación en energía térmica ha permitido el diseño de dispositivos tales como estufas, destiladores, colectores, celdas, entre otros [3]; mostrando la capacidad de alcanzar temperaturas óptimas para los diversos procesos [4]. El modelo de estufa solar presentado en este trabajo, ofrece una alternativa a la producción de aceites esenciales y la transformación de energía solar en energía térmica.

2. Materiales y Métodos

La estufa solar de tipo caja (horno solar), se construyó con dimensiones 0.3 m de ancho, 0.3 m de profundidad y 0.4 m de alto, de acuerdo al modelo descrito por El-Sebaii y colaboradores [5]; en el cual se adicionó un alambique de cobre grado alimenticio con salida de cuello de cisne y enfriamiento por aireación en espiral (Figura 1). El comportamiento del sistema, se monitoreó a través de las temperaturas alcanzadas, para lo cual, se instalaron termómetros digitales con sensores termopar tipo K en el recipiente, agua y ambiente. Así mismo, los datos correspondientes a la radiación solar incidente en la zona y en los tiempos donde se desarrolló el experimento se realizó por medio de la red de monitoreo ambiental online del INIFAP Zacatecas.

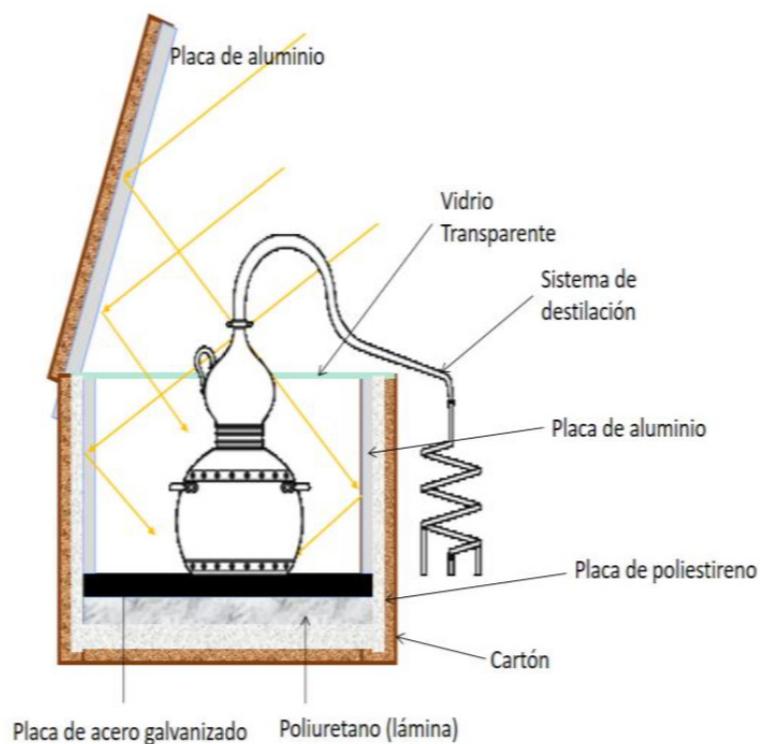


Figura 1. Estufa solar tipo caja con alambique de destilación.

El cálculo de la eficiencia de las estufas solares se determinó de acuerdo al modelo matemático descrito por Adewole y colaboradores [6], mostrado en la ecuación 1.

$$\eta_u = \frac{M_w C_w}{A_c I_{av}} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ec. (1)}$$

η_u : Eficiencia térmica general de la estufa solar

M_w : Masa del agua (kg)

C_w : Calor específico del agua ($J/kg \cdot ^\circ C$)

A_c : Área del colector (m^2)

ΔT : Diferencia de Temperatura entre T_{max} del fluido de cocción y T ambiente

Δt : tiempo requerido para alcanzar la T_{max} del fluido de cocción.

Mientras que la cantidad de energía requerida para llevar el proceso de la destilación se calculó mediante la ecuación 2.

$$Q = m \cdot C_p \cdot dT \quad \text{Ec. (2)}$$

Q : Cantidad de calor (kW)

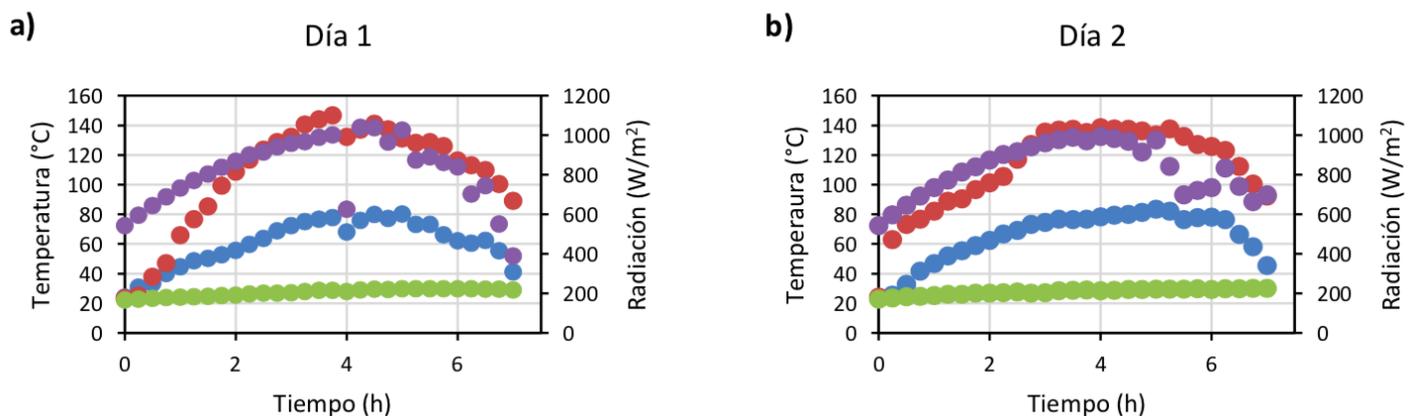
m : velocidad de masa del fluido (kg/s)

C_p : Capacidad Calorífica específica ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)

dT : Diferencia entre las temperaturas ($^\circ C$)

3. Resultados

Los resultados corresponden al monitoreo de trabajo en el sistema para cuatro días, obteniendo el registro de las temperaturas en el rango de las 09:30 horas hasta las 17:00 horas para cada día.



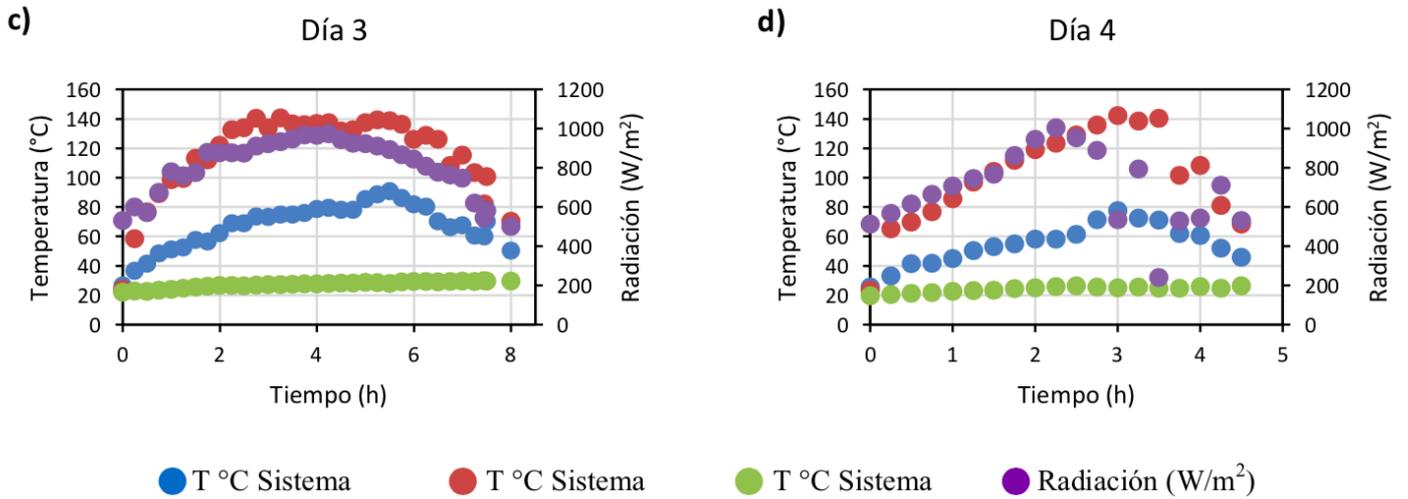


Figura 2. Temperaturas registradas por la estufa solar el a) 23, b) 24, c) 25 y c) 27 de julio de 2018.

El sistema, bajo las condiciones aquí propuestas, registra temperaturas entre los 70 y 80°C, mientras que el recipiente un máximo de 140°C (Figura 2a-d). Observándose que el comportamiento es dependiente de la radiación solar directa, las condiciones climáticas, así como del material y de la geometría del alambique. No obstante, en la estufa solar se registraron valores cercanos a los 80°C manteniéndose así por lo menos 3 horas, lo que representa el tiempo suficiente para generar el flujo de vapor de arrastre sobre la corteza de la planta y obtener así los aceites esenciales.

Debido a los datos obtenidos de temperatura, el prototipo de estufa solar diseñado, representó una excelente oportunidad para continuar con el monitoreo del proceso de destilación solar, por lo que se decidió agregar al interior del alambique 30 g de orégano seco y 1L de agua destilada con la finalidad de revisar su comportamiento (Figuras 3a y 3b).

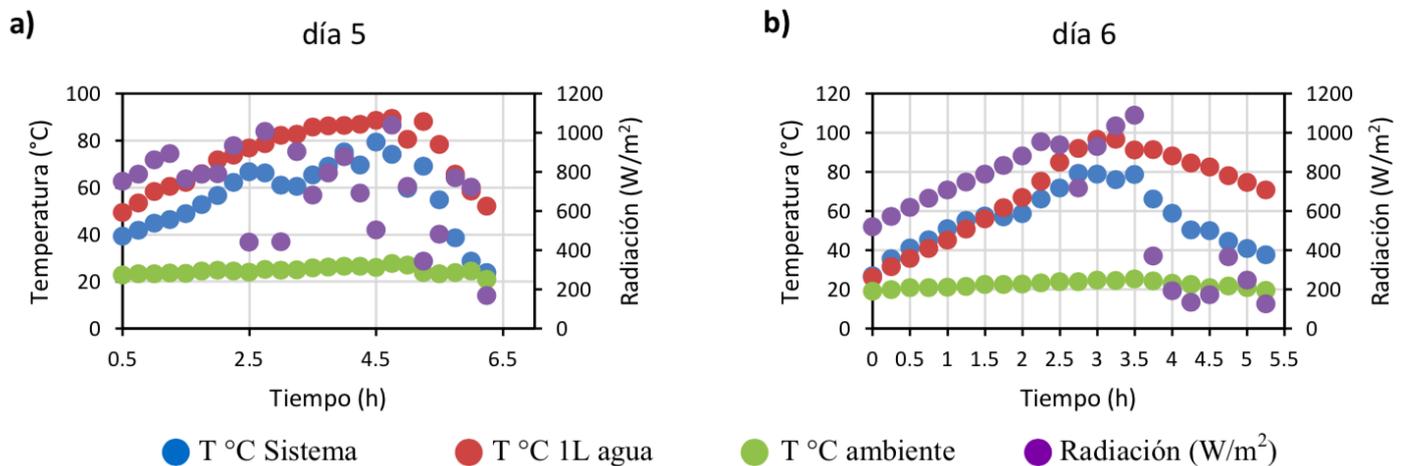


Figura 3. Temperaturas registradas durante el proceso de destilación con 1 L de agua, correspondiente a) 28 y b) 29 de julio de 2018.

Una vez que la materia orgánica se adicionó, la estufa solar registró valores por encima de los 90°C, sin obtener producción de vapor ni aceite esencial. Posiblemente por la recirculación de vapor al interior de alambique, provocando que el flujo de vapor de salida sea insuficiente, aún al utilizar un menor volumen de agua, 500 ml, sin encontrar diferencias significativas.

Con el fin de incrementar el desempeño térmico de la estufa solar, se realizaron modificaciones al sistema de destilación, tales como: el uso de material de acero inoxidable con capacidad menor de 300 ml, la adición de 12.5 g de orégano y 175 ml de agua destilada; mejorando el desempeño térmico de la estufa solar y resgistrando valores de 100°C, durante una hora (figura 4a y 4b). Además de la recolección aproximada de 10 ml de destilado con 0.4 ml del aceite esencial.

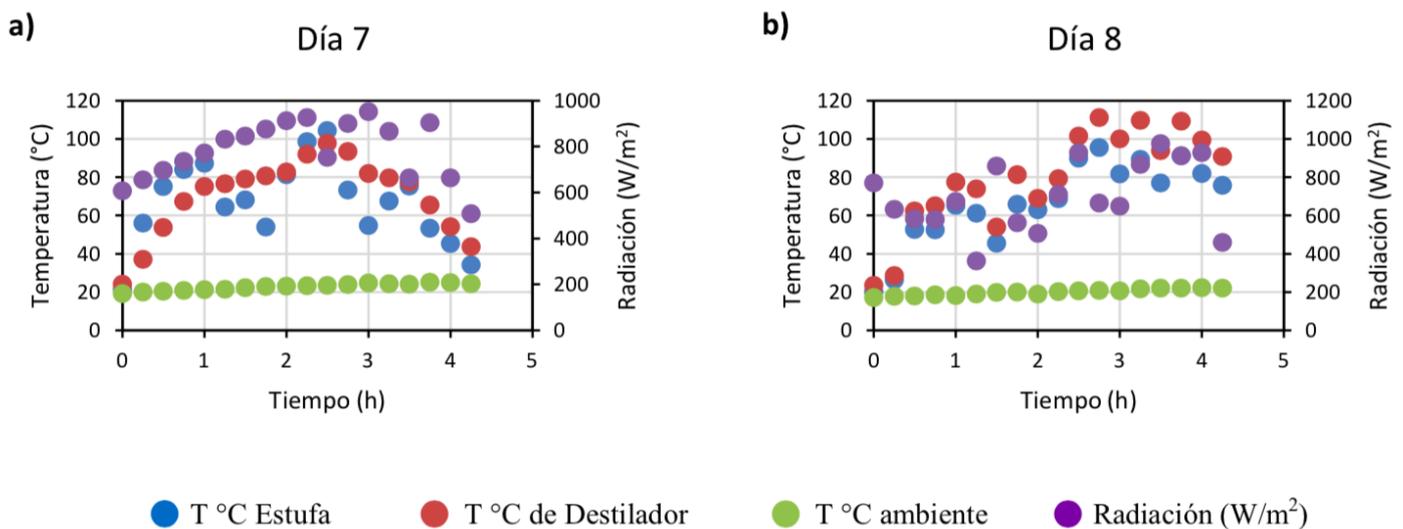


Figura 4. Temperaturas registradas durante el proceso de destilación con 175 ml de agua, los días a) 06 y b) 08 de octubre de 2018.

Los cálculos del desempeño de la estufa solar (eficiencia, temperatura máxima alcanzada por el fluido y la cantidad de energía requerida) con el alambique de cobre (Tabla 1, 28 y 29 de julio), y alambique de acero inoxidable (Tabla 1, 6 y 8 de octubre), mostraron diferencias apreciables en la eficiencia térmica, 0.45 para el sistema de cobre pero alcanzando los 96.6°C de temperatura máxima; mientras que el sistema con acero inoxidable, aunque menores eficiencias, registró valores de 110.9°C, además de la producción de destilado con aceite esencial de orégano.

Tabla 1. Desempeño térmico de la estufa solar.

	T max (°C)	I (W/m ²)	Eficiencia	Q (kJ)
28 de julio	89.3	712.63	0.24	268.00
29 de julio	96.6	617.00	0.45	294.67
6 de octubre	97.7	780.41	0.085	53.75
8 de octubre	110.9	699.40	0.10	63.82

En comparación con el modelo propuesto por El-Sebaili, equipo con multi-reflectores a diferentes ángulos, área de absorción de 1 m² con eficiencia global de 30% y valores cercanos a 140° C; el modelo de estufa solar aquí presentado, es más simple en su construcción, área 11 veces más pequeña que alcanza los 110°C con buena eficiencia y sobre todo más barato, indicando que es un buen equipo para utilizarse como estufa para extracción de aceites esenciales.

Por tanto, el modelo de estufa solar tipo caja propuesta permite alcanzar temperaturas deseables para el proceso de destilación y lograr así la extracción del aceite esencial sin el uso de energías derivadas del petróleo, a pesar de las diferencias en las condiciones climáticas.

4. Conclusiones

En los sistemas actuales de extracción de los aceites esenciales, las fuentes de calor más utilizadas son la energía eléctrica y combustibles derivados del petróleo. Una de las alternativas amigables al ambiente es la destilación solar, en donde la producción continua de flujo de vapor permite la extracción de los aceites esenciales. Sin embargo, para mantener las temperaturas de ebullición, dentro de la estufa solar, se requieren un aproximado de 3 horas, con la extracción de aceite esencial durante la primera hora de operación.

Los resultados obtenidos en las estufas solares tipo caja, indicaron que para mejorar el desempeño térmico de los equipos se debe tomar en cuenta: el material de construcción, el área de captación solar, la configuración de la geometría y las condiciones climáticas.

No obstante, la estufa solar presentada en este trabajo tiene una construcción simple, cuyos materiales utilizados se encuentran conformados por unicel (aislante), papel aluminio como reflector y cartón, teniendo un área 11 veces más pequeña que la reportada (1 m²) y alcanzando los 110 °C, con buena eficiencia térmica; que comparada con la elaborada por El-Sebaili, representa una alternativa de construcción fácil, barata y de buena eficiencia.

5. Referencias

- [1] C. Dima and S. Dima, "Essential oils in foods: Extraction, stabilization, and toxicity", *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 5, pp. 29-35, 2015.
- [2] P. Tongnuanchan and S. Benjakul, "Essential Oils: Extraction, Bioactivities, and Their Uses for Food Preservation," *J. Food Sci.*, vol. 79, no. 7, pp. 1231-1249, 2014.
- [3] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "State of the art of solar cooking: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3776-3785, 2012.
- [4] M. Sedighi and M. Zakariapour, "A Review of Direct and Indirect Solar Cookers," *Sustain. Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 44-51, 2014.
- [5] A. A. El-Sebaili, R. Domański, and M. Jaworski, "Experimental and theoretical investigation of a box-type solar cooker with multi-step inner reflectors," *Energy*, vol. 19, no. 10, pp. 1011-1021, 1994.
- [6] B. Z. Adewole, O. T. Popoola, and A. A. Asere, "Thermal performance of a reflector based solar box Cooker implemented in Ile-Ife, Nigeria", *Inter. J. Energ. Eng.*, vol. 5, no. 5, pp 95-101, 2015.

CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR COMPACTOS DE USO AUTOMOTRIZ PARA SU ADAPTACIÓN EN CALOR SOLAR DE PROCESOS INDUSTRIALES

Ismael Hernández-Landeros¹, Jorge A. Escobedo-Bretado*¹, Juan C. Velázquez-Chávez², Mario Najera-Trejo¹, Ignacio R. Martín-Domínguez¹, Brenda Hernandez-Elias¹, Dalila Vázquez-Espíritu³

¹Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Unidad Durango, Calle CIMAV #110 Ejido Arroyo Seco, Durango, Dgo. C.P. 34147, México. Teléfono +52 (614) 4394898

*jorge.escobedo@cimav.edu.mx

²Departamento de Metal – Mecánica, Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Durango Felipe Pescador 1803 Ote, Nueva Vizcaya, Durango, Dgo. C.P. 34080, México. Teléfono +52 (618) 829 0900

³División de Ingeniería en Energías Renovables. Universidad Tecnológica de Durango.

Carretera Durango-Mezquital km 4.5 S/N, Gabino Santillán C.P. 34308 Durango, Dgo. México Tel: (618)1373050

Resumen: En este trabajo se presenta el proceso de construcción e instrumentación de un banco de pruebas propuesto para obtener el comportamiento térmico e hidráulico de Intercambiadores de Calor Compactos de uso Automotriz (ICA's), que potencialmente podrían ser utilizados en proyectos de calor solar de procesos industriales. El banco de pruebas se compone principalmente de; un ventilador de flujo variable, un túnel de viento, un bastidor para colocar un ICA, bases de soporte para el ventilador y túnel y equipo de instrumentación. Se muestran las bases del dimensionamiento del túnel de viento como la forma, la sección transversal y la longitud. Se hace una breve descripción de la construcción del túnel de viento, los soportes y el ensamble general. Se presentan las capacidades de flujo de agua y aire mostrando las curvas del comportamiento hidráulico de la bomba y el ventilador utilizados en el banco. La máxima temperatura agua de trabajo será de 93 °C, que es la temperatura de saturación correspondiente a la presión atmosférica de la ciudad de Durango. Se describen los sensores y su posición normada en el caso de flujo de agua, temperatura de aire, presión de agua y presión de aire. En el caso de flujo de aire, el sensor se coloca en la posición que recomienda el fabricante. Se presenta el diagrama de flujo para el procesamiento de datos (monitoreo y adquisición). Dentro del análisis de incertidumbre se presentan las fuentes de incertidumbre de los parámetros que intervienen para obtener el compor-

tamiento térmico de un ICA. También se presentan diagramas de causa y efecto para encontrar el comportamiento térmico con los métodos de Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD) y el del Número de Unidades de Transferencia (NTU- ϵ). Finalmente se muestra una propuesta de metodología general de prueba basada en trabajos académicos y normas como la JIS D1614-1991 y la ANSI/ASHRAE Standard 79-2001.

Palabras clave: Banco de pruebas, intercambiadores de calor, metodología de prueba, análisis de incertidumbre.

1. Introducción

Los bancos de prueba de Intercambiadores de Calor Compactos Industriales (ICC's) son utilizados para determinar el comportamiento térmico e hidráulico de estos dispositivos termo-mecánicos. Generalmente esta información se presenta en forma de cartas o diagramas de fichas técnicas como se muestra en la Figura 1.

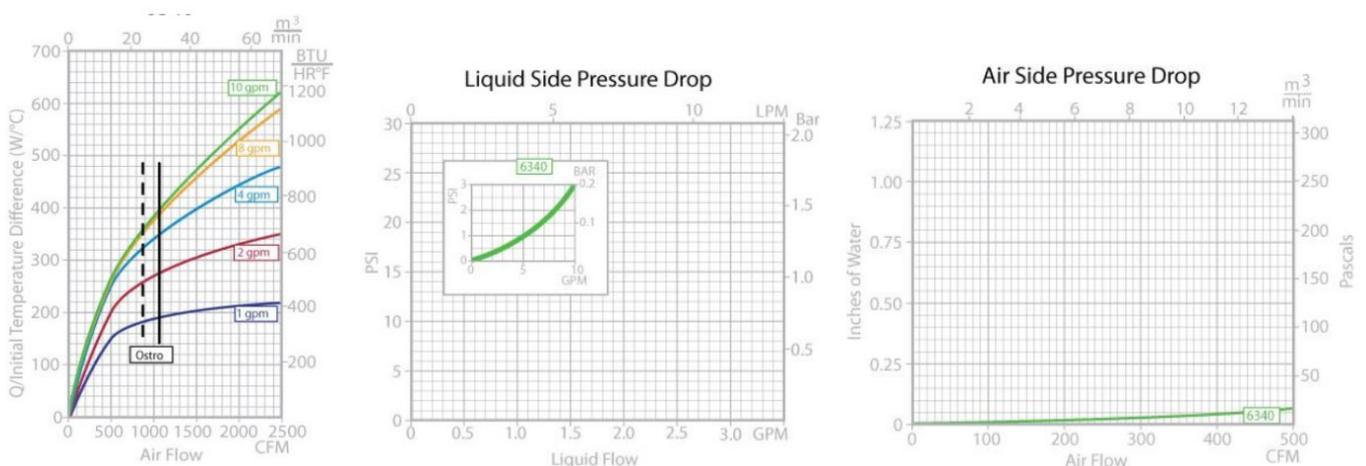


Figura 1. Comportamientos térmico e hidráulico típicos de intercambiadores de calor compactos [1].

En los bancos de prueba se pueden analizar ICA's, también conocidos como radiadores, cuyo diagrama de ficha técnica no está disponible comúnmente. Contar con esta información puede permitir aplicar ICA's, de costo relativamente bajo, en aplicaciones no automotrices como, por ejemplo, calor solar de procesos industriales y/o climatización de edificaciones, donde los ICC's empleados tienen un costo relativamente alto y deben ser importados, pero tienen la ventaja de que cuentan con una ficha técnica. En el presente trabajo se propone construir e instrumentar un banco de pruebas que permita obtener información técnica de ICA's de manufactura local (Durango).

2. Objetivo

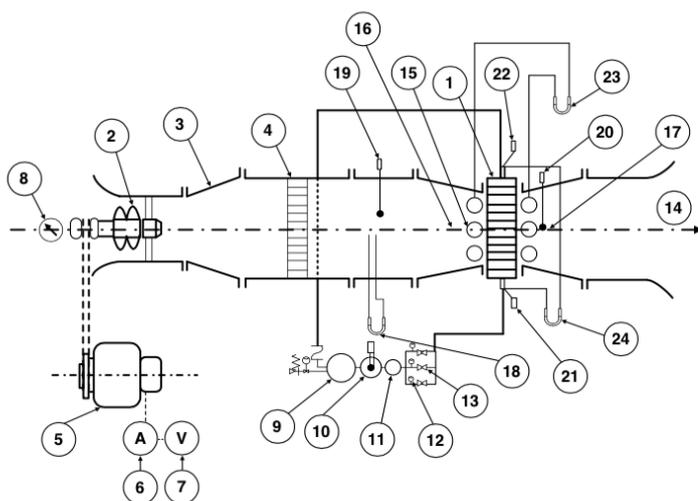
El objetivo del presente trabajo es construir un banco de pruebas para caracterizar intercambiadores de calor compactos de uso automotriz manufacturados localmente.

3. Antecedentes

La industria manufacturera de ICC's, las casas certificadoras de ICC's e ICA's, ingenieros que dimensionan sistemas térmicos y académicos alrededor del mundo, han mostrado su interés en desarrollar bancos de prueba que permitan obtener el comportamiento técnico de intercambiadores de calor del tipo compacto. Un banco de prueba de ICA's es un conjunto de ductos cuadrados y circulares unidos entre sí para integrar un túnel horizontal por el cual se induce un flujo de aire por el interior. El aire es forzado a pasar por el interior del túnel por medio de un ventilador axial o centrífugo tipo turbina desde un extremo del túnel y es expulsado por el otro extremo. Una sección del túnel tiene un bastidor para colocar un ICA, ocupando toda el área transversal y obligando al aire a que entre en contacto con él de manera normal. Previo a la sección del bastidor, el túnel debe tener un "honeycomb", una serie de conductos paralelos colocados a lo largo del eje de la corriente de aire y cubriendo toda la sección transversal, para minimizar los componentes laterales de velocidad causados por el movimiento de remolinos en el flujo de aire durante la entrada del túnel.

Bancos de pruebas de intercambiadores de calor compactos

Se ha encontrado en la literatura [2-5], que los bancos de prueba típicos, deben tener las características mostradas en la Figura 2. La forma, las secciones que lo componen, el equipo periférico, las tuberías y conexiones, el equipamiento y la instrumentación, son similares en todos los trabajos.



1-Radiador, 2-Ventilador, 3-Cuerpo del túnel de viento, 4- Normalizador de flujo (panal de abeja), 5-Motor de derivación, 6-Amperímetro, 7-Voltímetro, 8-Medidor de velocidad del ventilador, 9-Termotanque, 10-termotanque suplementario, 11-Bomba y motor de enfriamiento, 12-Medidor de flujo de enfriamiento, 13-Valvula ajustable de enfriamiento, 14-Dirección de viento, 15-Tubo de conexión, 16-Aguas arriba (entrada), 17-Aguas abajo salida, 18-medidor de flujo de aire, 19-Temperatura de aire de entrada, 20-Temperatura de aire de salida, 21-Temperatura de entrada del refrigerante, 22-Temperatura de salida del refrigerante, 23- Indicador de columna de líquido (agua) para la pérdida de presión lateral de aire, 24-Indicador de columna de líquido (mercurio) para la pérdida de presión lateral de aire.

Figura 2. Diagrama esquemático de un túnel de viento típico [4].

4. Dimensionamiento del túnel de viento del banco de pruebas

Debido a que no se han encontrado en la literatura, o no están disponibles comercialmente, normas para el dimensionamiento de bancos para probar exclusivamente ICA's, el presente trabajo se basó en lo siguiente:

- La forma (de bancos de pruebas existentes)
- La sección transversal (de ICA's disponibles comercialmente)
- La longitud (distancia necesaria para la correcta instrumentación de flujo de aire)

Forma

Entre la literatura académica, de fabricantes y de empresas que prueban ICA's [5-17], se han encontrado bancos de pruebas que pueden ser representados por la forma que se muestra en la Figura 3. Esta forma se toma como base para construir el túnel de viento del presente trabajo.

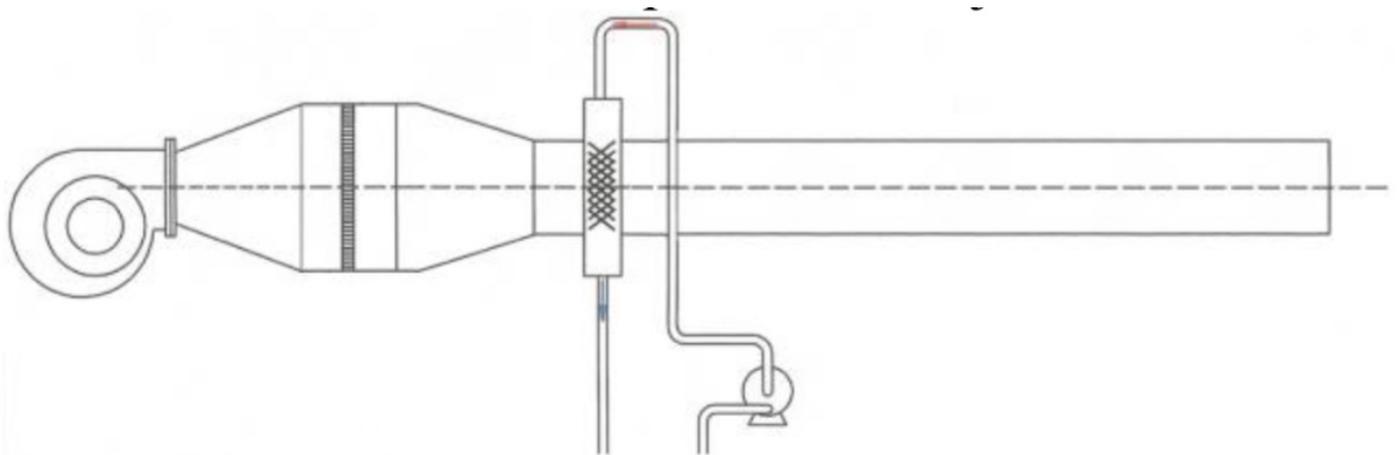


Figura 3. Forma típica de un túnel de viento para probar ICA's

Sección transversal

El dimensionamiento de la sección transversal se basó en los tamaños de los intercambiadores de calor automotriz de manufactura local (Durango) y que cumplen, en la medida de lo posible, con una forma cuadrada para la facilidad de montaje en la sección de prueba del banco. La mayor empresa local de manufactura de intercambiadores de calor del tipo compacto, tiene en su catálogo 138 modelos, de los cuales, 17 se acercan a la forma cuadrada, con una diferencia máxima de 4 cm entre la base y la altura. Figura 4a.

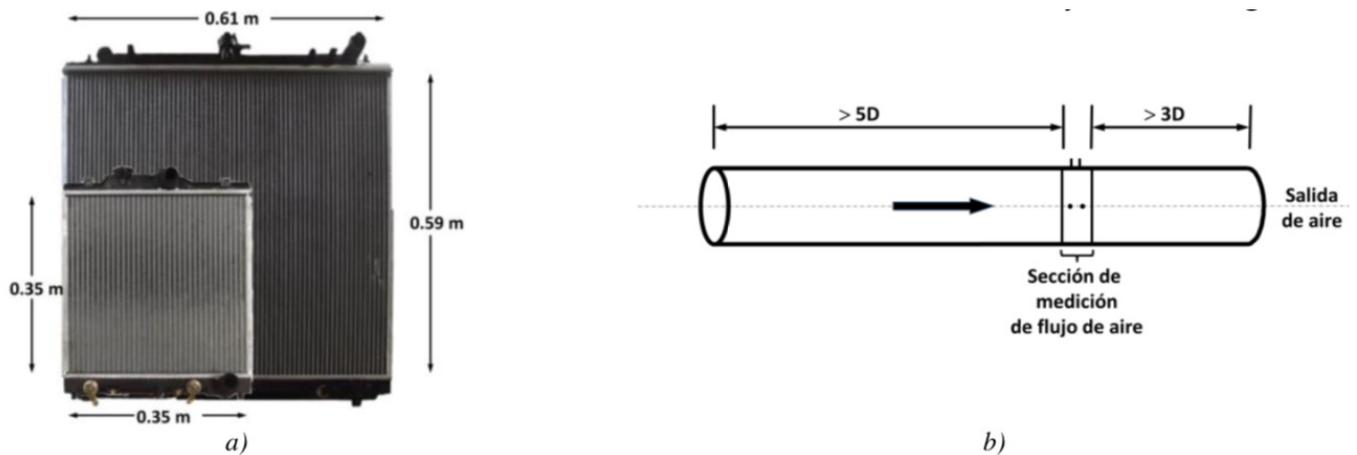


Figura 4. a) Comparativa de los radiadores, relativamente cuadrados, de mayor y menor dimensión disponibles comercialmente [19]
 b) Longitud necesaria recomendada por el fabricante para la lectura del flujo de aire [20].

La sección transversal propuesta del banco de prueba es cuadrada de 0.61 m de lado.

Longitud

El dimensionamiento de la longitud se basó en la distancia necesaria para el desarrollo del perfil de flujo de aire en el ducto. Este perfil desarrollado es requerido por el medidor de flujo de aire. En la Figura 4b, se muestra un esquema de los requerimientos de longitud del ducto para la correcta lectura del flujo de aire. El ducto debe tener, al menos, 5 diámetros hidráulicos anteriores al sensor de flujo de aire y 3 posteriores [20].

Bosquejo del banco de pruebas propuesto

En base a los criterios de dimensionamiento anteriores, se propone el banco de pruebas de la Figura 5.

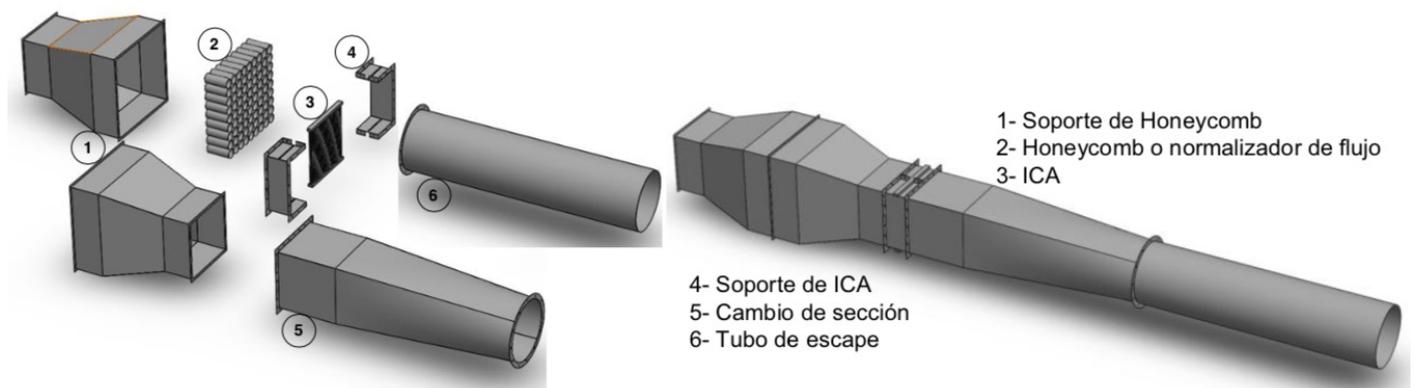


Figura 5. Componentes individuales e integrados del túnel de viento propuesto.

5. Construcción e instrumentación del banco de pruebas

Construcción del banco de pruebas

Túnel

Siguiendo los planos de dimensionamiento, se construye el túnel de viento con lámina de acero galvanizado calibre 18 y se refuerza con bridas de acero al carbón en los extremos de cada segmento (Ver Figura 6).

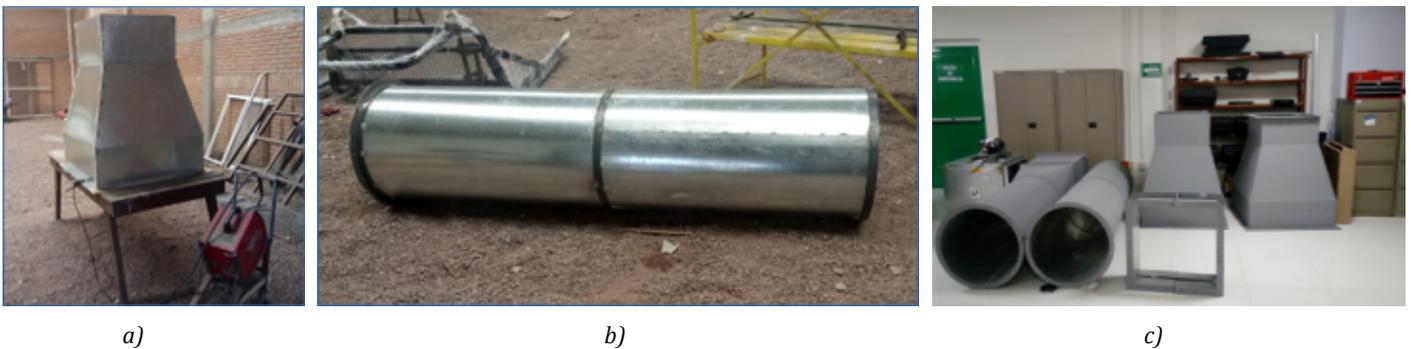


Figura 6. a) Soporte de honeycomb, b) Tubo de escape c) Piezas individuales del túnel de viento.

Soportes

Los soportes del túnel de viento fueron construidos de perfil de aluminio (disponible en el centro de trabajo). Se construyen soportes para el ventilador centrífugo, normalizador de flujo y ducto de salida de aire.

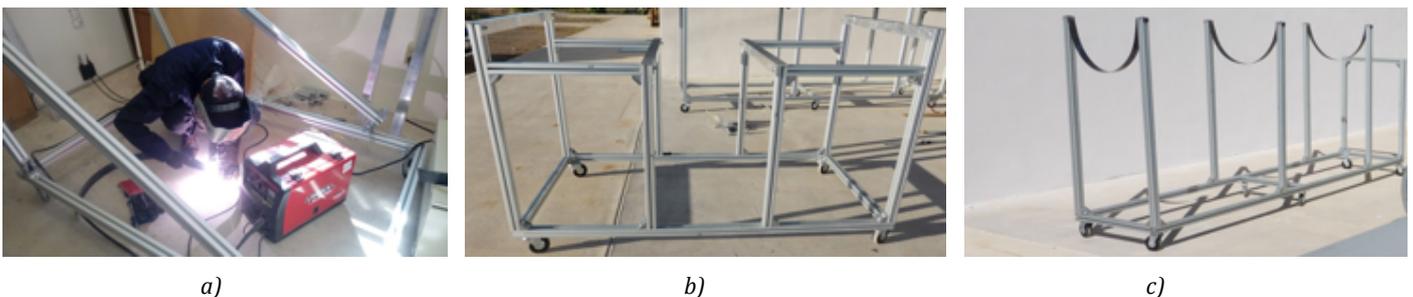


Figura 7. a) soldadura de soportes de acero, b) Estructura del normalizador de flujo, c) Estructura para el ducto de salida de aire.

Ensamble

Parte de la colocación del túnel de viento sobre los soportes se muestra en la Figura 8a. En la Figura 8b se muestra el ICA en el soporte. Este soporte tiene empaques de neopreno para reducir las fugas de aire.



Figura 8. a) Túnel de viento sobre los soportes, b) ICA en soporte.

La integración del túnel de viento sobre los soportes se muestra en la Figura 9. Se observa que el ICA se encuentra en la parte media ligeramente a la derecha del túnel, libre de los soportes.



Figura 9. Integración del túnel de viento para probar ICA's.

Capacidades generales de flujos y temperaturas

Para los flujos de agua y aire, se cuenta con la bomba Bell & Gossett NRF-36 y el ventilador centrífugo CLD-15 de $\frac{3}{4}$ HP de S&P. Las capacidades se muestran en la figura 10a y b.

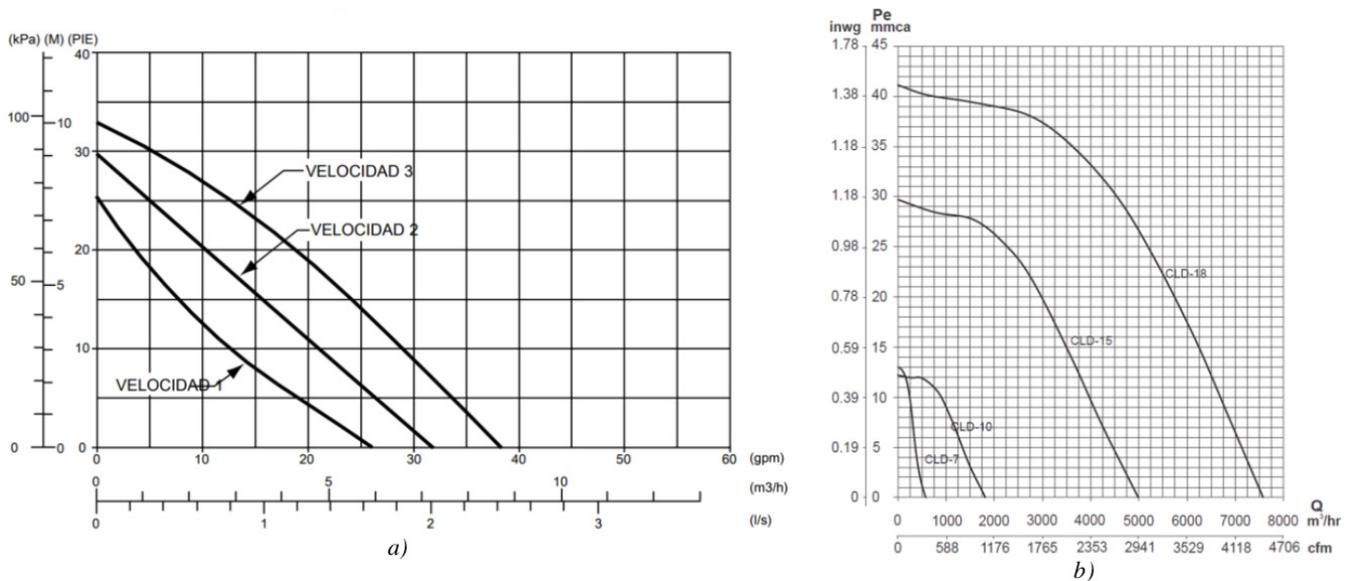


Figura 10. Curvas de comportamiento de: a) bomba y b) ventilador.

Las pruebas podrán hacerse con temperaturas del agua desde la ambiente hasta 93°C, que es la temperatura de saturación correspondiente a la presión atmosférica de la ciudad de Durango.

La energía térmica de calentamiento de agua para las pruebas, será provista por un Sistema Solar-Auxiliar de Calentamiento de Agua Multipropósito (SCAAM). Este sistema de captación y almacenamiento de energía solar térmica cuenta, actualmente, de 8 colectores solares certificados de 2.5 m², dos termotanques de 300 L cada uno, una caldera auxiliar y un sistema de recirculación de flujo. El SCAAM es capaz de proporcionar agua caliente al banco de pruebas de ICA's de hasta 93°C y flujos de agua desde 0.2 a 2.2 L/s.

Instrumentación del banco de pruebas

Sensores

Para conocer el comportamiento térmico del ICA se requiere saber, principalmente, el flujo másico de aire a través del túnel de viento, el flujo másico de agua por el ICA, la temperatura del aire de entrada al ICA, la temperatura del aire de salida del ICA, la temperatura del agua de entrada al ICA y la temperatura del agua de salida del ICA. En la Tabla 1 se muestran las características de los sensores utilizados, así como su posición.

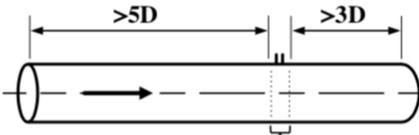
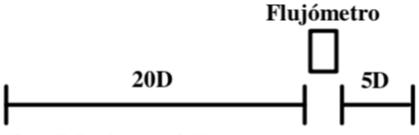
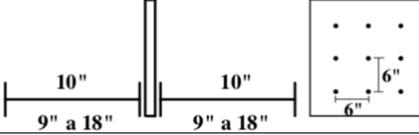
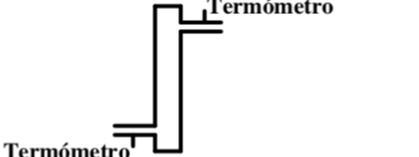
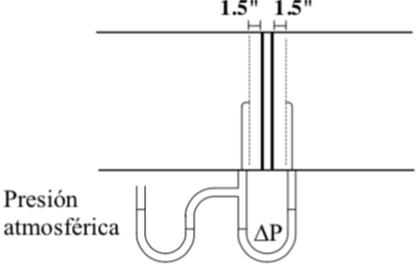
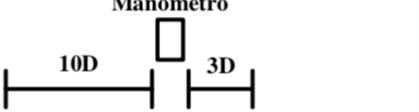
Parámetro	Marca y/o Modelo	Precisión	Rango de operación	Descripción	Posición del Sensor
Flujo de aire	KIMO Instruments CP210	5%	3-100 m/s 9-10,000 Pa	Temperatura 0-200°C Presión estática máxima 2 Bar	 <p style="text-align: center;">Sensor de flujo</p> <p style="text-align: center;">Manual del Fabricante</p>
Flujo de agua	SHENZEN	10 %	2 a 45 L/min	Sensor de Efecto Hall Conexión de 3/4". F=2.6 Q-5 Rango de voltaje 4.5 a 18 V. Máxima corriente 18 mA	 <p style="text-align: center;">Flujómetro</p> <p style="text-align: center;">ISA-RP-31.1-1977</p>
Temperatura de aire	DS18B20	± 0.5°C	-55 a 125 °C	Resolución de 9 a 12 bits. Tiempo de captura inferior a 75 Ω. Alimentación: 3 a 5.5 V	
Temperatura de agua	DS18B20	± 0.5°C	-55 a 125 °C	Sumergible. Resolución de 9 a 12 bits. Tiempo de captura inferior a 75 Ω Alimentación: 3 a 5.5 V	 <p style="text-align: center;">Termómetro</p> <p style="text-align: center;">Termómetro</p>
Presión de aire	FLUKE 922	± 1%	± 4000 Pa	Condiciones de operación Temperatura 0 a 50°C Humedad relativa 0 a 90% Altitud 2000 m	 <p style="text-align: center;">Manómetro</p> <p style="text-align: center;">ASHRAE 41.2-1987 (RA 1992)</p>
Presión de agua	Cole Parmer	± 0.25%	0 a 100 psig	Rango de temperaturas de -40 a 85°C. Conexión de 3/4"	 <p style="text-align: center;">Manómetro</p> <p style="text-align: center;">BSR/ASHRAE Standard 30-2017R</p>

Tabla 1. Características de los sensores utilizados en el banco de pruebas.

En la Figura 11a se identifican, en un esquema, los sensores distribuidos en el banco de pruebas. La Figura 11b presenta el diagrama de flujo para el procesamiento de datos (monitoreo y adquisición).

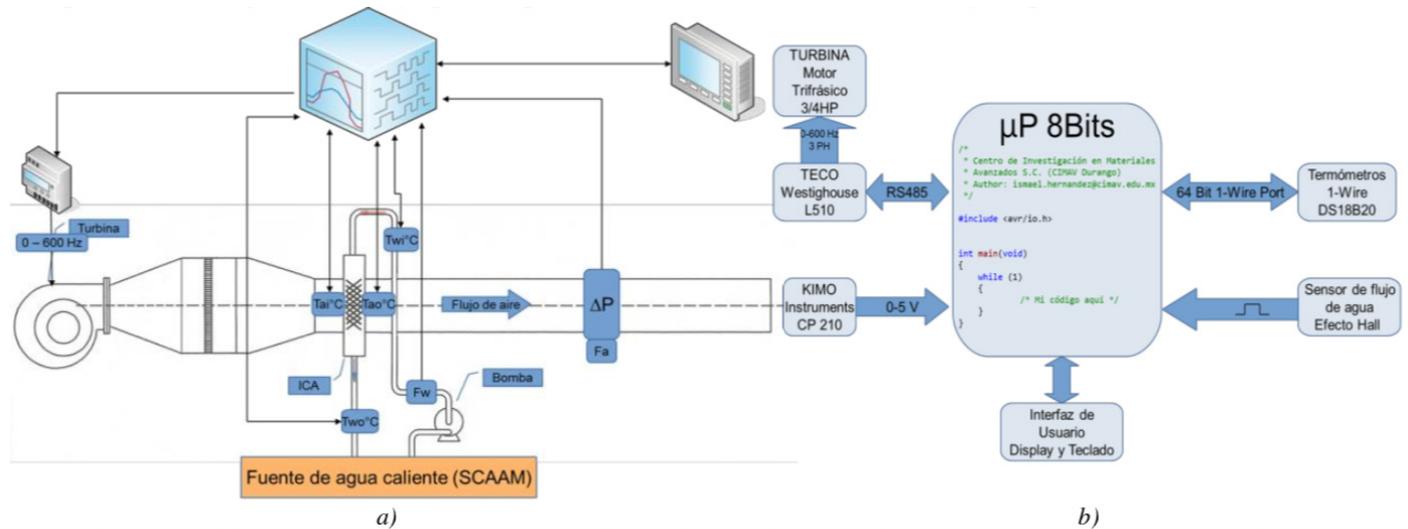


Figura 11. a) Esquema de la instrumentación del túnel de viento, b) Diagrama de flujo para monitoreo y captura de datos.

6. Análisis de incertidumbre

El comportamiento térmico de cada ICA probado, podrá ser obtenido por medio de dos metodologías; el método de la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD) y el método del Número de Unidades de Transferencia (NTU- ϵ). Cada metodología toma parámetros medidos por los sensores y los procesa. Para dar validez a los resultados del comportamiento térmico, en este trabajo, se ha desarrollado una metodología de análisis de incertidumbre. En la Tabla 2 se presentan las fuentes de incertidumbre de los parámetros que se toman en cuenta para obtener el comportamiento térmico de un ICA.

Parámetro	Fuentes de Incertidumbre		Tipo de Evaluación
Temperatura de agua de entrada al ICA (Twi)	Temperatura	- Resolución del sensor	B
	Temperatura	- Reproducibilidad de los datos	A
Temperatura de agua de salida del ICA (Two)	Temperatura	- Resolución del sensor	B
	Temperatura	- Reproducibilidad de los datos	A
Temperatura de aire de entrada al ICA (Tai)	Temperatura	- Resolución del sensor	B
	Temperatura	- Reproducibilidad de los datos	A
Temperatura de aire de salida del ICA (Tao)	Temperatura	- Resolución del sensor	B
	Temperatura	- Reproducibilidad de los datos	A
Flujo másico de agua (Fw)	Densidad	- Establecida	B
	Velocidad	- Resolución del sensor	B
		- Reproducibilidad de los datos	A
Área	- Repetibilidad	A	
Flujo másico de aire (Fa)	Velocidad	- Resolución del sensor	B
		- Reproducibilidad de los datos	A
	Área	- Repetibilidad	A

Tabla 2. Fuentes de Incertidumbres del análisis térmico de un ICA [25].

En las Figuras 12 y 13, se muestra que el mesurando es función de diferentes ecuaciones que contienen parámetros medidos y constantes físicas. Una vez que se obtienen las fuentes de incertidumbre mediante la evaluación presentada en la Tabla 2, se aplica la ley de propagación de la incertidumbre. Se aplican formulas específicas para obtener la incertidumbre total de la ecuación cuando solo se presentan operaciones aritméticas. Cuando se tiene una ecuación que consta de diferentes operaciones se debe aplicar el método de la incertidumbre combinada, es decir, obtener las derivadas parciales respecto a cada variable, evaluarlo con sus valores absolutos del mensurando, multiplicarlo por su incertidumbre individual y obtener la raíz cuadrada de la sumatoria de cada valor elevado al cuadrado.

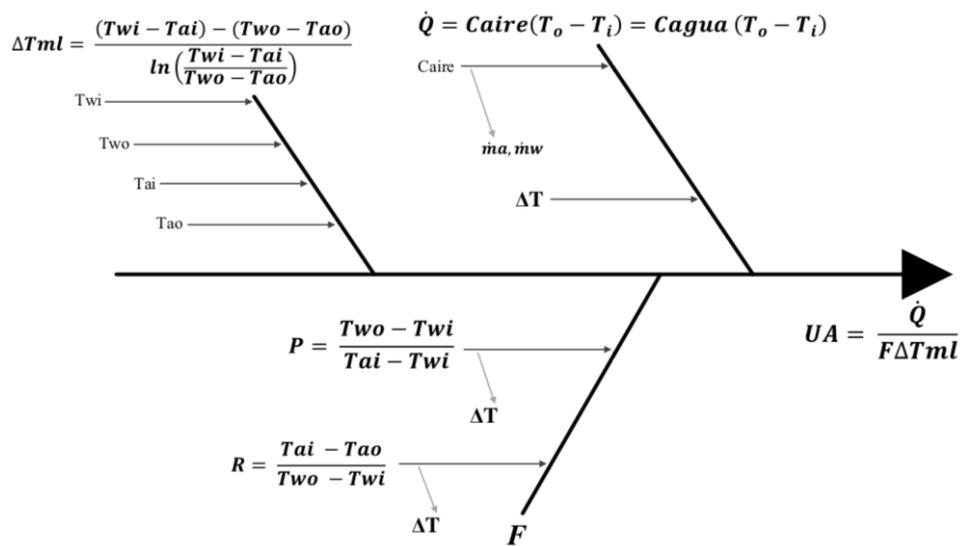


Figura 12. Diagrama causa-efecto para la metodología LMTD [25].

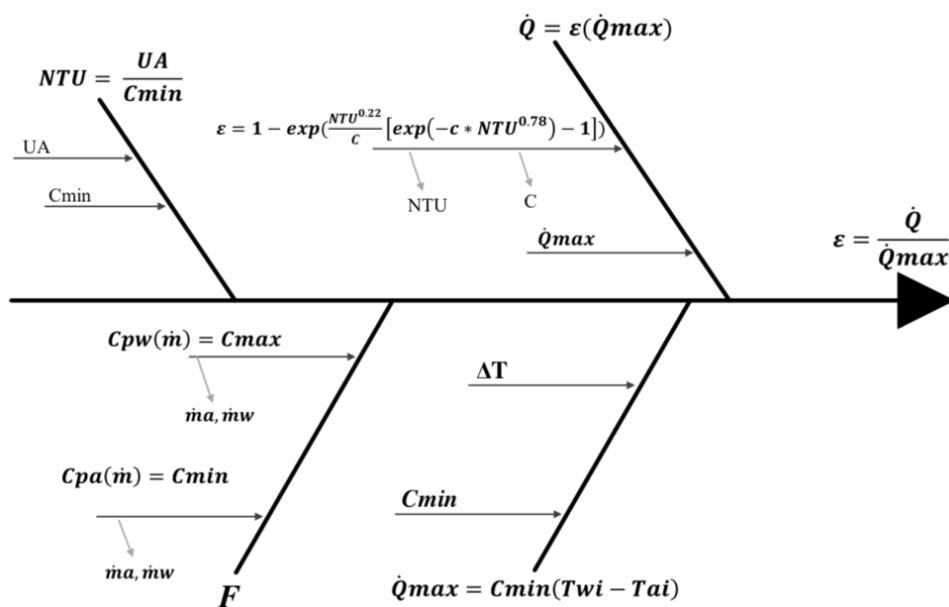


Figura 13. Diagrama causa-efecto para la metodología NTU - ε [25]

\dot{Q}	Flujo de calor	Cmin	Capacidad calorífica mínima
\dot{m}_a	Flujo másico de aire	Cmax	Capacidad calorífica máxima
\dot{m}_w	Flujo másico de agua	Cpw	Calor específico del agua
T_i	Temperatura de entrada	CPa	Calor específico del aire
T_o	Temperatura de salida	\dot{Q}_{max}	Máxima tasa de transferencia de calor
Caire	Capacidad calorífica del flujo aire	C	Relación entre capacidad calorífica $C = f(C_{min}, C_{max})$
Cagua	Capacidad calorífica del flujo agua	ϵ	Efectividad
F	Factor de corrección $F = f(P, R)$	UA	Coefficiente global de transferencia de calor

Tabla 3. Nomenclatura para los diagramas causa-efecto de las metodologías LMTD y NTU- ϵ

7. Metodología de prueba

Se propone una metodología de prueba para caracterizar intercambiadores de calor compactos de tipo automotriz basándose en el trabajo de Abugaber (2003) [26], desarrollo y validación de una metodología para caracterizar térmicamente radiadores automotrices. Además, se tomó información de la norma: JIS D1614-1991, Radiator performance test, desarrollada por Ford Company [27]. Por otra parte, se tomaron conceptos y procedimientos de la norma ANSI/ASHRAE Standard 79-2001 [28].

La metodología general de la prueba consiste en:

- Un registro preliminar de prueba.
- Revisión de las condiciones específicas de la instrumentación.
- Elegir las condiciones generales de prueba.
- Pasos a seguir para realizar la prueba.
- Conectar el ICA.
- Realizar conexiones de tuberías.
- Regular flujos de aire y agua deseados (se incluye tabla de flujos de referencia).
- Mantener condiciones estables.
- Realizar la prueba experimental de la cual se debe de cumplir con lo especificado en la tabla de tolerancias de variaciones de prueba.
- El ICA se deberá probar con un mínimo de 5 diferentes flujos.
- Realizar los cálculos correspondientes por medio de la metodología LMTD y NTU-3 para determinar el comportamiento térmico.
- Realizar análisis de incertidumbre de los resultados obtenidos.

8. Conclusiones

Se construyó un banco de pruebas para caracterizar térmica e hidráulicamente Intercambiadores de calor compactos de uso automotriz manufacturados localmente.

El banco de pruebas esta instrumentado con sensores colocados bajo norma en el caso de flujo de agua, temperatura de aire, presión de agua y presión de aire. En el caso de flujo de aire, el sensor se coloca en la posición que recomienda el fabricante.

Se tiene la capacidad de un flujo de aire desde 4,623 m³/h con una caída de presión de 3.17 mm columna de agua, hasta 3,101 m³/h con una caída de presión de 19.05 mm columna de agua.

Se tendrá la capacidad de un flujo de agua desde alrededor de 0.2 L/s a una altura de 9 m hasta un flujo de 2.2 L/s a una altura de 1m.

El banco de pruebas de ICA's, unido al SCAAM, podrá hacer pruebas con un volumen disponible de 600 litros de agua a una temperatura máxima de alrededor de 93 °C.

Se tiene una metodología propuesta para el análisis de incertidumbre y una metodología de prueba de intercambiadores de calor compactos.

8. Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:

Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango, a través del Programa: *Apoyos Institucionales y Financiamiento a Proyectos de Investigación, 2017-2019.*

Para el desarrollo y presentación de este trabajo.

9. Referencias

- [1] <https://www.lytrondirect.com/6340-copper-tube-fin-heat-exchanger/6340/>
- [2] Khot A. R., Thombare D. G., Gaikwad S.P., Adadande A.S. G. An Overview of Radiator Performance Evaluation and Testing. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. ISSN: 2278-1684, PP: 07-14. (2012).
- [3] Ying Huang, Lunjun Chen, Meijun Li, Bing Zhang, Xiaoling Chen, Linna Zhang. Influence of radiating tube type on heat dissipation of assembled radiators. ISSN: 0392-8764 Vol. 35, No. 2, June 2017, pp. 249-254. DOI: 10.18280/ijht.350203. (2017).
- [4] Pratibha R. Walunj, Nitin Korde, Rahul Dhanore. Review of Method of Testing of Heat Dissipation Performance of Radiator. *Special Issue on International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME) V-5 No.2 ISSN (Print): 2319-3182, For National Conference on Advances in Design and Thermal Engineering (NCADTE-2016) G.H. Rasoni College of Engineering & Management, Chass, Ahmednagar, Maharashtra 17th to 18th February 2016.* (2016)
- [5] Naraki, S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, Y. Vermahmoudi. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal of Thermal Sciences* 66 (2013) 82-90. (2013).
- [6] Automotive Parts Distribution International (APDI) y grupo ENTEREX. <https://www.apdius.com/about/>. (2018).
- [7] <http://www.bancoindia.com/bespoke-engineering-engine-cooling-system/>
- [8] <https://www.ugent.be/ea/floheacom/en/research/groups/thermo/compact-heat-exchangers.htm>
- [9] S.Baskar and R Rajaraman. Thermal management of automotive heat exchanger under obstructed cooling air flow path: A Case Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. DOI:10.1007/s 40997-018-0216-3. Springer. 2018.
- [10] <https://www.highpowermedia.com/t/Editorial-Team>
- [11] Eton Y. Ng, Simon Watkins, Peter W. Johnson, Lindsay Mole. Measuring Local Time-Averaged Airflow Velocity through an Automotive Heat Exchanger. *14th Australasian Fluid Mechanics Conference. Adelaide University, Adelaide, Australia. 10-14 December 2001.* (2001).
- [12] Eton Yat-Tuen Ng. *Vehicle Engine Cooling Systems: Assessment and Improvement of Wind-Tunnel Based Evaluation Methods. A thesis submitted in accordance with the regulations for the degree of Doctor of Philosophy. Vehicle Aerodynamics Group*

- School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering. RMIT University. Melbourne, Australia. August 2002. (2012).
- [13] Dawid Taler, Artur Cebula. *Determining thermal contact resistance of the fin-to-tube attachment in plate fin-and-tube heat exchanger*. 2nd International Conference on Engineering Optimization September 6 - 9, 2010, Lisbon, Portugal. (2010).
- [14] <https://www.coolingpackages.com/>
- [15] <http://www.dolphinml.com/>
- [16] <http://www.teksonsradiators.com/>
- [17] <https://serckheatexchange.co.uk/>
- [18] <http://www.fab.net.au/newgallery/pwr-wind-tunnel/>
- [19] ARMAS Radiadores. 2018. *Catálogo de productos 2018*. Grupo ARMAS Intercambiadores de calor automotriz.
- [20] *Technical Data Sheet*. 2018. DEBIMO AIR FLOW MEASURING BLADES. KIMO Instruments.
- [21] ISA-RP31.1-1977. (1977). *Specification, Installation, and Calibration of Turbine Flowmeters. Recommended Practice*. ISBN 0-87664-371-3.
- [22] ANSI/ASHRAE Standard 41.1-1986 (RA 2001), *Standard Method for Temperature Measurement*.
- [23] BSR/ASHRAE Standard 30-2017R. *Method of Testing Liquid Chillers. First Public Review Draft. First Public Review (October 2018). (Complete Draft for Full Review)*.
- [24] ASHRAE Standard 41.2-1987 (RA 1992), *Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement*
- [25] Vázquez Espíritu Dalila. 2019. *Desarrollo de una metodología para pruebas experimentales de un intercambiador de calor compacto automotriz de manufactura duranguense para su aplicación en calor solar de procesos industriales. Memoria de Estadía*. División de Ingeniería en Energías Renovables Universidad Tecnológica de Durango.
- [26] Abugaber Francis Juan. 2003. *Desarrollo y validación de una Metodología para caracterizar térmicamente radiadores automotrices*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- [27] JIS D1614-1991. *Radiator performance test*. Ford Company
- [28] ANSI/ASHRAE Standard 79-2001

SECADOR SOLAR EN UN CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO

EMPLEANDO DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE AMBIENTAL

Josefina Pelegrina¹, Jorge J. Chan^{1*ID}, Iram Ramírez¹, Margarita Catillo-Téllez

¹Universidad Autónoma de Campeche- Facultad De Ingeniería

*Correspondencia jorjchan@uacam.mx

Resumen: En el siguiente trabajo se presenta un sistema experimental de deshumidificación y calentamiento de aire atmosférico, basado en un sistema de acondicionamiento de aire tipo ventana (alimentado con energía fotovoltaica) cuyo diseño original fue modificado para obtener condiciones óptimas de secado (50-60°C y 10-20% de humedad relativa) en el estado de Campeche, México, donde el promedio diario anual de temperatura y humedad relativa del ambiente son de $31 \pm 0.1^\circ\text{C}$ y $75 \pm 1\%$, respectivamente. Este sistema experimental está acoplado a un secador solar de gabinete. Se realizaron pruebas experimentales en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche en las que se evaluó experimentalmente el funcionamiento de tres procedimientos distintos de secado solar en hojas de naranja agria (*Citrus Aurantium*), utilizando para ello secadores tipo gabinete: por convección natural, por convección forzada y por medio del prototipo. En las pruebas se encontró que el tiempo de secado es menor en este último, comparado con los otros dos, pues se logra controlar la humedad y temperatura del aire de proceso.

Palabras clave: *Deshumidificación, secador solar tipo gabinete, secado solar, energía fotovoltaica, citrus aurantium.*

1. Introducción

Campeche está situado geográficamente en la Península de Yucatán, México. Está ubicado entre los paralelos $17^\circ 49'$ y $20^\circ 51'$ latitud norte y entre los meridianos $89^\circ 06'$ y $92^\circ 27'$ longitud oeste. Tiene un clima cálido húmedo, con temperatura de bulbo seco promedio anual de 31°C y humedad relativa del 70 al 86% a lo largo del año [1]. Colinda al noreste con el Estado de Yucatán, al este con el estado de Quintana Roo, al sureste con Belice, al sur con la República de Guatemala, al suroeste con el Estado de Tabasco y al oeste con el golfo de México.

Campeche, posee una extensión total de 57.924 km^2 , 3,0% del territorio nacional. Su población total, según cifras del Censo de Población y Vivienda 2015, es de 899,931 habitantes; Campeche se



Figura 1. Localización geográfica del estado de Campeche en la Península de Yucatán, México.

encuentra en una posición de transición entre la selva tropical del Petén guatemalteco y la selva baja caducifolia del extremo norte de la península de Yucatán.

Desde el punto de vista de disponibilidad de recurso energético renovable Campeche cuenta con recurso eólico considerado como marginal moderado cuya densidad de potencial de viento es de 150 a 250 W·m⁻² y una velocidad de 5.0 a 5.6 m·s⁻¹, a una altura de 30 metros, con respecto del nivel de suelo de acuerdo a datos proporcionados por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL)[2], figura 2. En lo que respecta al recurso solar se cuenta con una irradiación que va de 4.5 a 6 kWh·m⁻²·día. Estos últimos los proporciona también NREL[2] en sus reportes de insolación en México, figura 3.

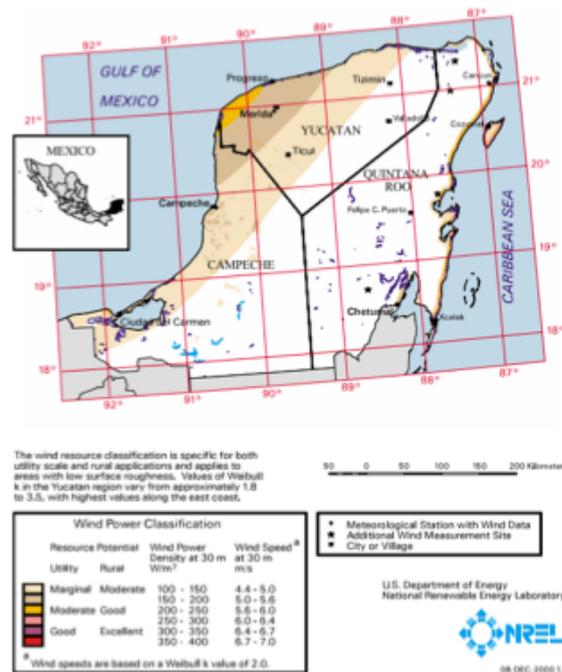


Figura 2. Recurso eólico en la Península de Yucatán, México. U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory.

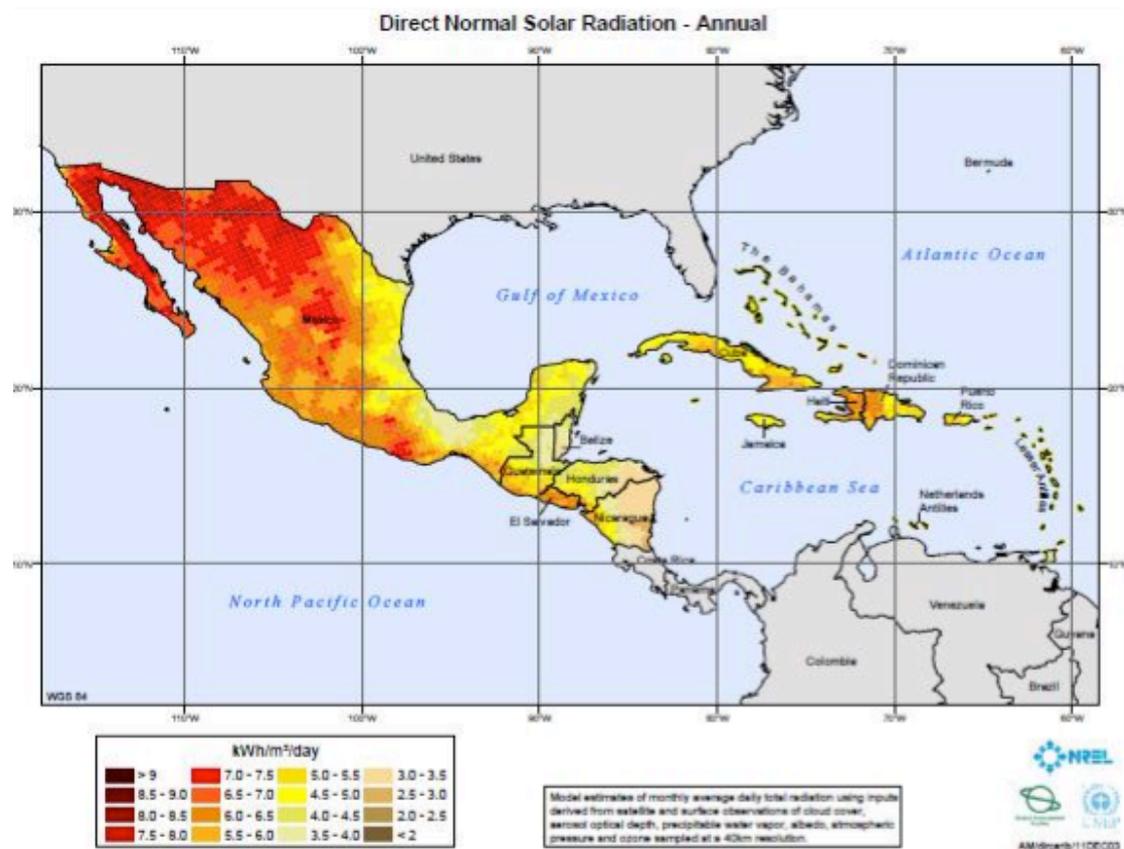


Figura 3. Recurso solar en la República Mexicana. U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory.

Para el desarrollo económico y social del estado de Campeche una de las prioridades de las autoridades gubernamentales es impulsar las actividades productivas en apoyo al desarrollo de las zonas rurales, particularmente las productoras de alimentos, que cuentan con nacientes medios y una carente infraestructura energética que logre mejorar la calidad e higiene de sus productos, en otras palabras darles un alto valor agregado.[1] En el Estado de Campeche el sector agroindustrial tiene necesidades de secado de productos, para darles un mayor tiempo de conservación y valor agregado, en vistas de ingresar al mercado internacional; por lo que se requiere un método de secado eficaz para un clima cálido-húmedo (Humedad relativa: $75 \pm 1\%$, temperatura promedio: $31 \pm 0.1^\circ\text{C}$, altura: al nivel del mar) que procure la calidad e higiene de los productos a secar.

El concepto de secado se refiere al proceso de separar un líquido, generalmente agua, del sólido que lo retiene [2], cuyo objetivo es la conservación de los diversos productos para usos posteriores, mejorando el tiempo de almacenamiento, minimizando pérdidas durante el mismo, alargando el periodo de consumo del producto y ahorrando costos en su transporte.

Existen, principalmente, tres métodos de secado: a cielo abierto, utilizando secadores solares o con secadores industriales. El secado solar ha sido una técnica utilizada para la preservación de los productos alimenticios, principalmente granos, cárnicos y pescado, plantas y algunos frutos.[3] Los secadores solares surgen como respuesta a las desventajas de los secadores a cielo abierto, donde el tiempo de secado es lento y las condiciones del mismo están sujetas a las adversidades climáticas, además de que el producto puede sufrir el ataque de insectos u otros animales rastreros, y en el aspecto bromatológico su calidad se ve disminuida; en el caso de los secadores industriales, el costo y la demanda energética son altos, lo que no resulta viable.

Ya que el tiempo de secado depende de varios factores, como: tipo de producto, tamaño de las unidades del producto, velocidad del flujo másico de aire seco/caliente, temperatura del aire y humedad relativa del aire [4]. En el Estado de Campeche, aún con los beneficios que presentan los secadores solares, el tiempo de secado de los productos es lento, debido a que el aire del medio ambiente contiene una humedad relativa alta (75% promedio y, en días nublados y de lluvia cercana al 100%). Es decir, el aire se acerca a su estado de saturación, por lo que no podrá contener más agua, dicho en otras palabras, no podrá retirarle la suficiente cantidad de agua a los productos a secar, por lo que se vuelve un procedimiento ineficaz.

Atendiendo a esta necesidad, se desarrolló un sistema experimental de deshumidificación y calentamiento de aire, a partir de un sistema de acondicionamiento de aire de tipo ventana (alimentado con energía fotovoltaica), cuyo diseño fue modificado para ser acoplado a un secador solar tipo gabinete y obtener condiciones óptimas de secado en el Estado de Campeche, donde la temperatura y humedad relativa promedio diario anual son de 27°C y 75%, respectivamente. La función del prototipo es tomar aire del ambiente, deshumidificarlo (pasando de 75% al 10% de humedad relativa), e incrementar su temperatura (de 27°C a 60°C). Los parámetros finales anteriores son los idóneos para el secado. [5]

2. Metodología

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo en cuatro etapas: diseño teórico, diseño de prototipo, construcción y realización de pruebas de operación.

2.1 Diseño teórico:

En esta etapa se definieron teóricamente los procesos psicométricos que ocurren dentro del prototipo: [6]

2.1.1. Proceso 1: Enfriamiento Sensible y Deshumidificación del aire

Durante este proceso se presenta una pérdida de calor sensible y calor latente, el aire caliente y húmedo se enfría con el equipo de aire acondicionado hasta un punto inferior a la temperatura de rocío. Se dice que el aire está saturado por humedad y se condensa el exceso de humedad contenido en el aire. Después de este proceso se tiene aire frío y seco. En el sistema de acondicionamiento de aire empleado, el punto de rocío se alcanza a los 22°C; el aire se sigue enfriando hasta alcanzar aproximadamente 14°C, que es la temperatura mínima del evaporador y límite de enfriamiento del equipo.

2.1.2. Proceso 2: Calentamiento Sensible

Durante este proceso se presenta un aumento de temperatura debido, únicamente, a la ganancia de calor sensible, ya que la humedad absoluta se mantiene constante. Aprovechamos el calor sensible disipado por el condensador. La temperatura promedio del condensador es de 60°C. Se ilustran los procesos psicrométricos 1 y 2, en la figura 4.

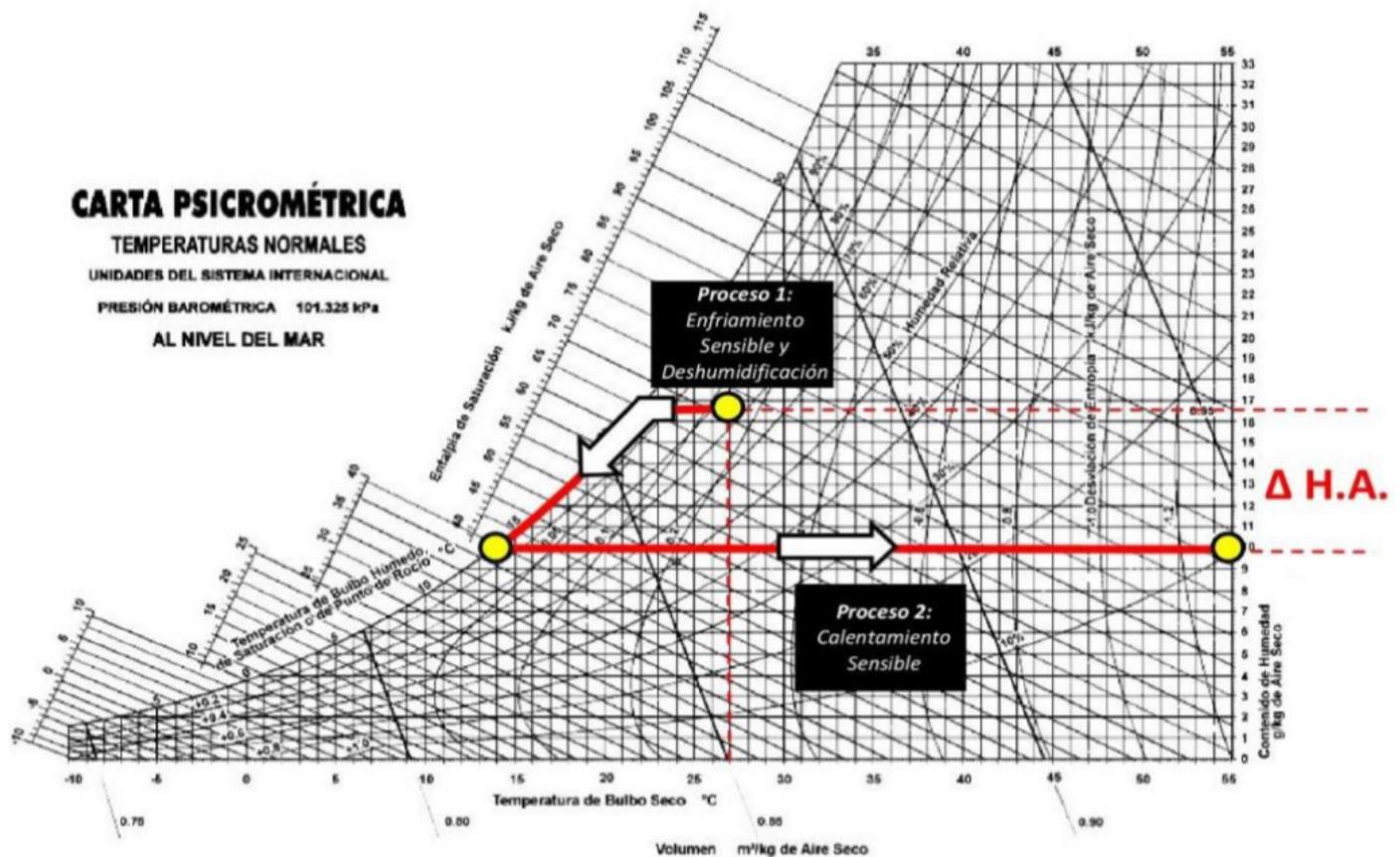


Figura 4 Procesos Psicométricos planteado para la deshumidificación del aire ambiental.

3. Pruebas de operación

Se evaluó experimentalmente el comportamiento de tres procedimientos distintos de secado solar en hojas de naranja agria (*Citrus aurantium*), en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UAC. Se utilizaron tres cámaras de secado solar similares (tipo gabinete) en forma simultánea, de tres formas diferentes de secado: por convección natural, por convección forzada y por medio del sistema experimental. A los tres gabinetes se les colocó una malla sombra (tipo invernadero), para proteger el producto de la incidencia directa de los rayos del Sol y evitar la degradación del producto, como se muestra en la figura 5.

El material a secar fue la hoja de naranja agria, adquirida en la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche. Previo a los trabajos de secado realizaron trabajos preliminares, tales como el corte de las ramas y selección y separación de las hojas; posteriormente se seleccionaron por medio de un análisis visual para obtener un grupo homogéneo, basado en la madurez, color, olor y frescura. Se lavaron, se secaron y pesaron antes de la realización de las pruebas.



Figura 5. Gabinetes de secado solar con malla sombra en la parte superior: a) convección natural, b) prototipo, c) convección forzada.

Para la parte de medición, se colocaron mini-termo higrómetros: dentro de cada gabinete y el último dispuesto para las mediciones de temperatura y humedad relativa del ambiente. En cada secador se registraron mediciones de temperatura y humedad relativa interiores a la altura de la charola cada 30 minutos, así como el peso de las muestras. De igual forma se midieron irradiancia solar, humedad relativa y temperatura del aire atmosférico. También se consideraron los datos obtenidos de una estación meteorológica localizada en la Facultad. Por otro lado, con un anemómetro digital, se midió la velocidad del flujo másico de aire dentro del gabinete acoplado al prototipo; se obtuvo una medición promedio de 3.4 m/s. La tabla 2 nos proporciona detalles al respecto.

Por último, se conectó una manguera a un lateral del prototipo, con la finalidad de recolectar el agua condensada, en un recipiente graduado, y medirla.

Parámetro	Sensor	Intervalo de operación	Precisión
Temperatura	Termohigrómetro	-5 a 70°C	±1 °C
Irradiancia	Fotocelda	0 a 1300 W·m ⁻²	±5 W·m ⁻²
Humedad	Termohigrómetro	5 a 99 %	±5 %
Vel. viento	Anemómetro	0.5 a 28 m·s ⁻²	±1 %
Masa	Balanza precisión	0 a 70 gr	±0.03 %

Tabla 2. Parámetros de los sensores usados en el estudio experimental.

Previamente en el estado de Campeche Castillo Téllez et al, ha realizado estudios acerca del secado de la hoja de naranja agría (resultados próximos a ser publicados) con los que se compararon los resultados obtenidos en las pruebas de secado mediante el prototipo.

Con el sistema experimental de deshumidificación y calentamiento de aire, se logró disminuir la humedad absoluta del aire ambiente, elevar su temperatura, y mantenerlas en condiciones estables, a pesar de los cambios climáticos. Durante los días de prueba, se recabaron datos de humedad relativa y de temperatura que permitieron comparar el funcionamiento de cada proceso, así como la relación entre el tiempo de secado y la reducción de peso que registró el producto dentro de cada gabinete. Las figuras 6 y 7 muestran individualmente los tres secadores solares de tipo directo (SSD) con hojas de naranja agría, durante las pruebas experimentales.



Figura 6. Secadores solares de tipo directo por convección natural.

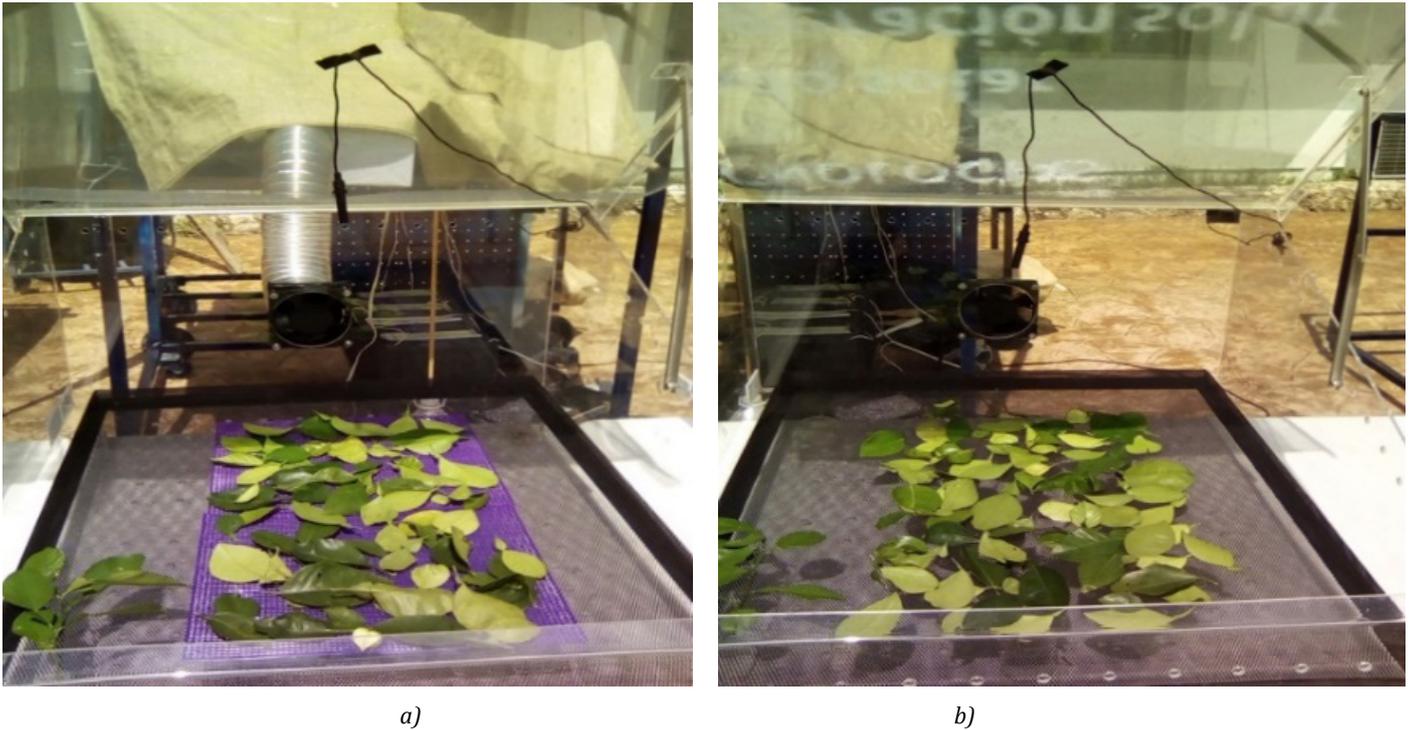


Figura 7. Secadores solares de tipo directo a) acoplado a un sistema experimental de deshumidificación y calentamiento de aire por convección forzada. b) por convección forzada.

4. Resultados

El estudio experimental de un secador solar en un clima cálido-húmedo empleando deshumidificación del aire ambiental se llevó a cabo en la explanada de la Facultad de ingeniería, de la Universidad Autónoma de Campeche, ubicada en el Campus V, en la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche (Latitud: 19°50'47" N, Longitud: 90°28'38" O). La ciudad tiene un clima cálido-húmedo (temperatura promedio de 27°C y humedad relativa promedio 75%). Para este estudio se reportaron las pruebas más significativas, en condiciones horarias similares. Los resultados y conclusiones de dichos experimentos se detallan a continuación:

La humedad relativa dentro de la cámara de secado del prototipo mostró estabilidad; se tuvo una precisión de valores de $\pm 1\%$. El promedio se fue de 17.4%. Los resultados muestran una disminución, promedio, de 60% de humedad relativa con respecto a la humedad relativa ambiental; mientras que en las otras dos cámaras de secado la disminución de humedad fue menor y menos estable, tal como se puede apreciar en las figuras 8, 12 y 15.

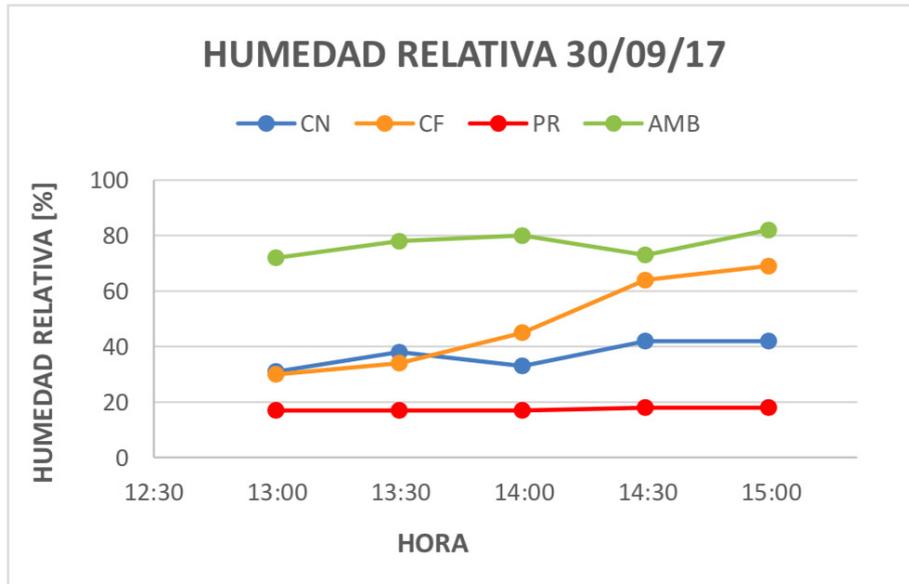


Figura 8. Gráfica Humedad relativa con respecto del tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente.

Con respecto a la temperatura el prototipo mantuvo una temperatura promedio de 50 °C en la cámara de secado, mientras en el exterior se manifestó una temperatura promedio de 32.5°C, tal y como se observa en las figuras 9, 13 y 16.

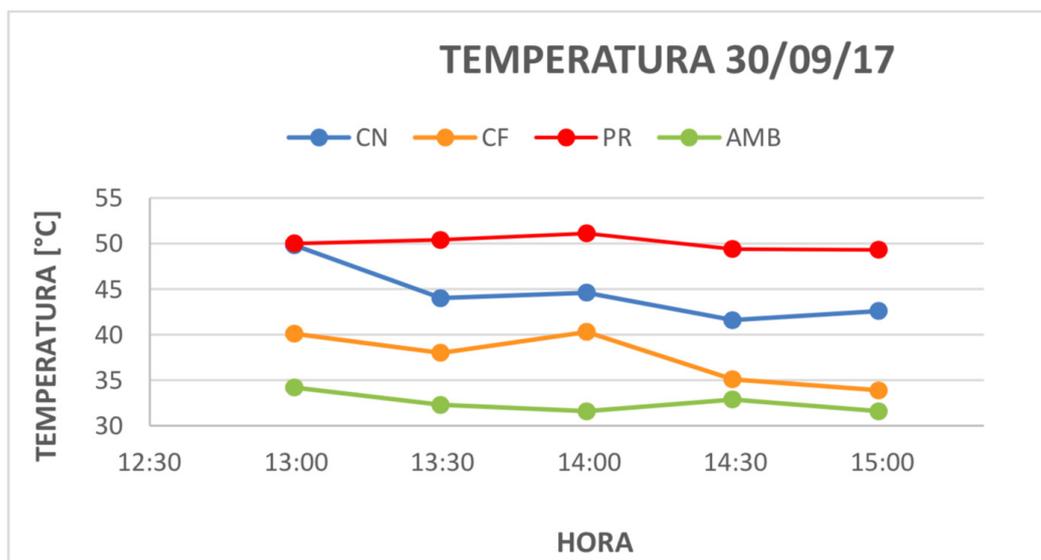


Figura 9. Gráfica de temperatura con respecto del tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente.

En el día 30 de septiembre, los parámetros medidos dentro de la cámara de secado del prototipo, contrastaron con los valores medidos en los otros métodos de secado; se observa una mayor disminución de masa de las hojas de naranja agria en el prototipo, figura 10. Se destaca que este día presentó alta nubosidad, condición poco propicia para secado solar, como se puede notar en la figura 11, y sin embargo se logró secar el producto dentro del prototipo.

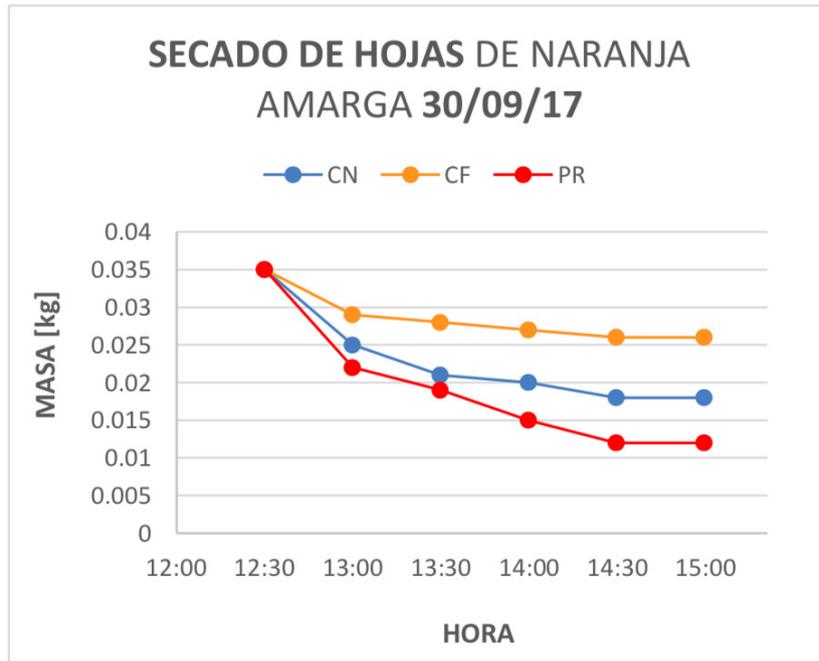


Figura 10. Pérdidas de masa con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo.

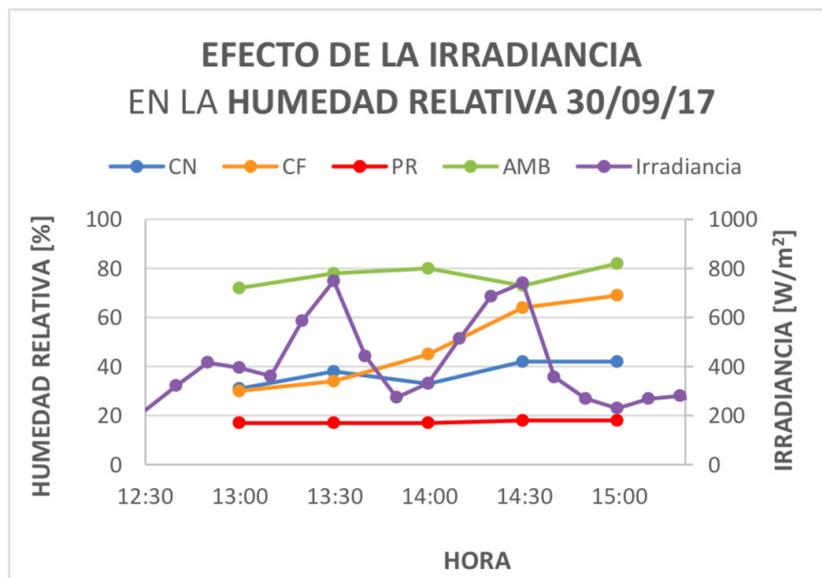


Figura 11. Comparativo del efecto de la irradiancia sobre la Humedad relativa con respecto del tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente.

Durante el día 12 de octubre, se obtuvo un valor final de 10% de humedad relativa, en el prototipo; dicho valor también fue alcanzado en la cámara de secado por convección natural, sin embargo, esto ocurrió hasta después de dos horas de prueba, mientras que en el prototipo se alcanzó en media hora. Es decir, la deshumidificación del aire interior se llevó más rápidamente en el prototipo. La humedad relativa ambiental se reportó con un promedio de mediciones de 41%. Lo anterior se observa en la figura 12.

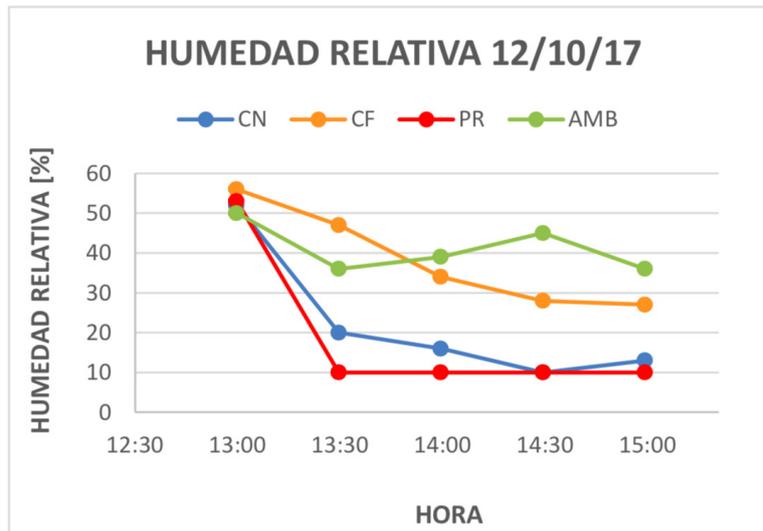


Figura 12. Gráfica Humedad relativa con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente

Las temperaturas dentro de las cámaras de secado en el transcurso de estas pruebas, alcanzaron valores máximos de 60.5°C en el prototipo, 58.4°C por convección natural, y 47°C en convección forzada; los resultados se muestran en la figura 13.

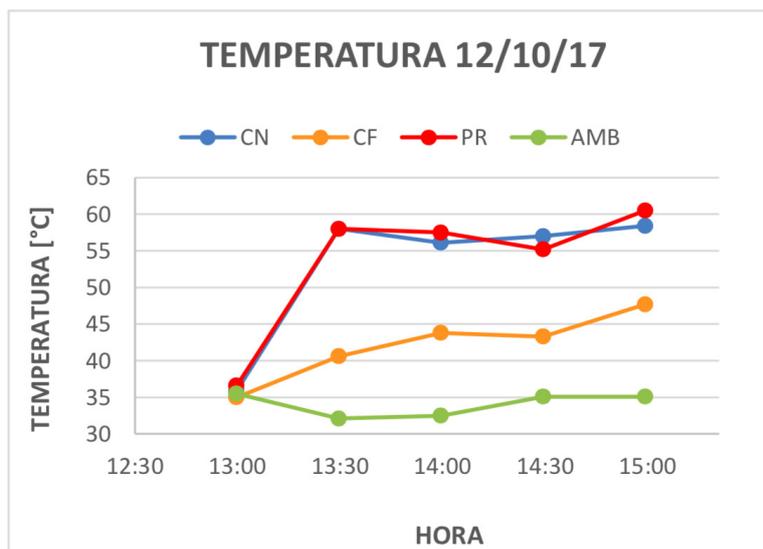


Figura 13. Gráfica de temperaturas con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente

Para el día 12 de octubre, se observó en el secado de las hojas de naranja, una disminución de 53.5%, 42.8% y 21.4% de su masa inicial en las cámaras de secado del prototipo, del secador por convección natural y del secador por convección forzada, respectivamente, siendo más efectivo el secado dentro del prototipo propuesto. Como se muestra en la figura 14.

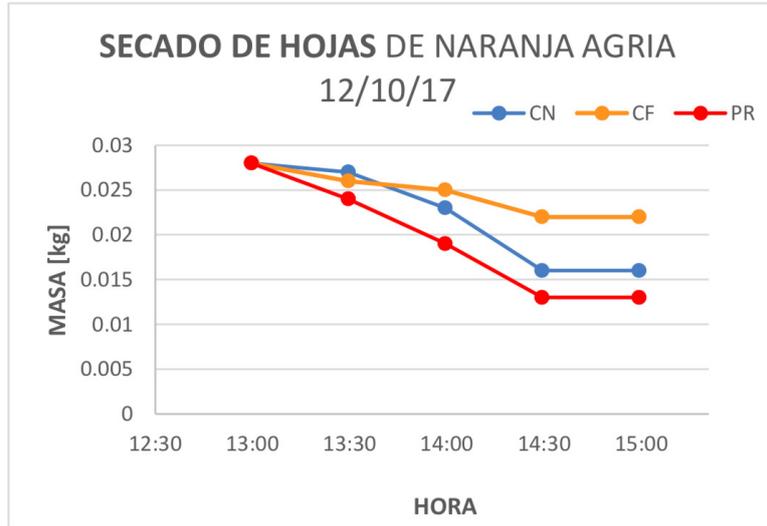


Figura 14. Pérdidas de masa con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo.

En el día 13 de octubre, se mantuvo la misma tendencia descrita en los párrafos anteriores; las condiciones más propicias para secado de alimentos se encontraron en el secador por convección natural y en el prototipo propuesto. Entre los dos métodos de secado mencionados, los valores de pérdida de masa, de humedad relativa y de temperatura son muy similares. Lo siguiente se percibe con mayor claridad en las figuras 15 y 16.

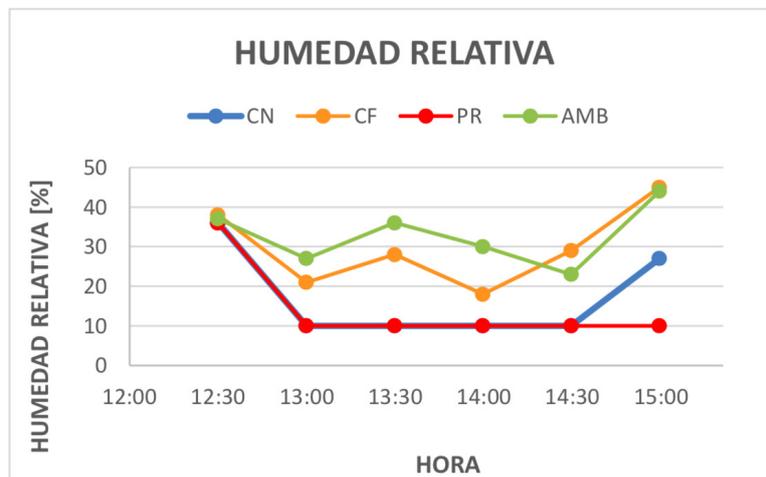


Figura 15. Gráfica Humedad relativa con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente

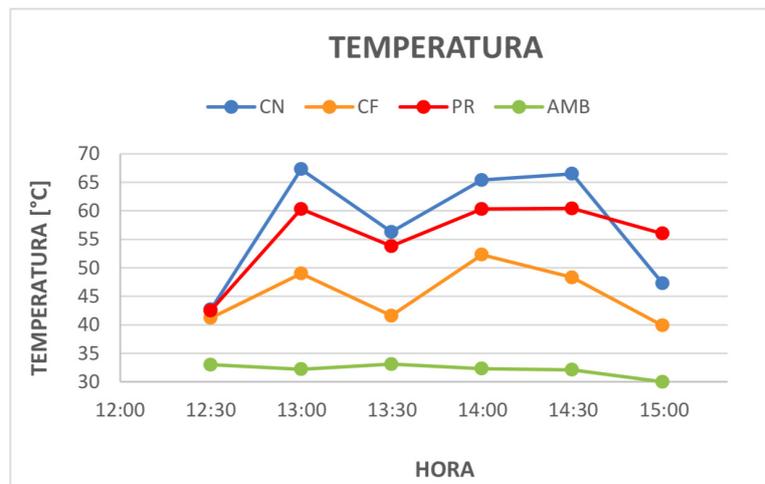


Figura 16. Gráfica de temperaturas con respecto al tiempo. CN, convección natural, CF, convección forzada, PR, prototipo, AMB, ambiente.

Es interesante resaltar las mediciones de entre las 14:30 y 15:00 horas, en donde, debido a una disminución de la temperatura ambiental e incremento de humedad relativa de la misma, en el interior de la cámara de secado por convección natural se registró un cambio que fue de la mano con los parámetros ambientales (la humedad relativa aumentó un 20% y la temperatura descendió casi 20 °C); mientras que en el prototipo la humedad relativa se mantuvo constante y la temperatura sólo descendió 5 °C, a pesar de las condiciones climatológicas.

4.1. Resumen de resultados en los tres tipos de gabinetes

Los resultados de las pruebas en el prototipo de deshumidificación y calentamiento de aire muestran estabilidad en los parámetros de humedad relativa y temperatura durante los días de experimentación. Adicionalmente, los valores observados son los óptimos para realizar el secado solar, (de 50 a 60 °C y 10-20% de humedad relativa). Tales resultados son relevantes al mostrar una independencia de las condiciones meteorológicas, características del clima en donde se realizaron las pruebas, es decir, un clima cálido-húmedo.

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se analizó el comportamiento de la humedad relativa dentro de cada gabinete de secado. La figura 17, muestra estabilidad en los parámetros de humedad relativa observados dentro del gabinete de secado acoplado al prototipo. Se obtuvieron valores constantes de 10% de humedad relativa, cuando la humedad relativa del ambiente presentó valores de entre 23 a 50%. Excepto un día nublado y lluvioso; en ese día se registró una humedad relativa promedio al interior del gabinete de 17%, mientras que la humedad relativa del ambiente osciló entre 72 y 82%. Por otra parte, en los días registrados, se observa que en la primera media hora, la humedad relativa disminuye considerablemente, y se mantiene estable hasta el final del proceso de secado.

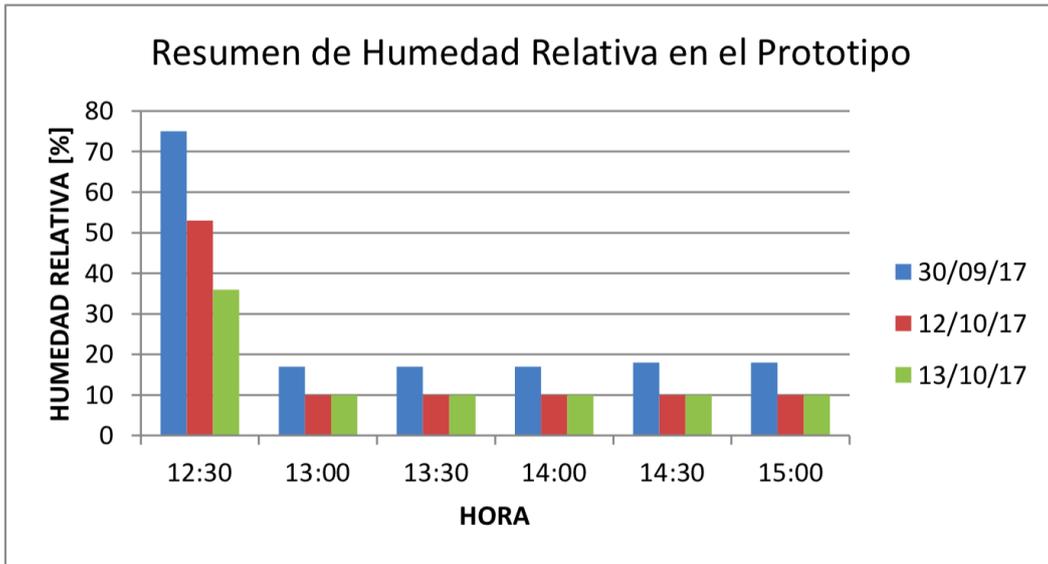


Figura 17. Gráfica de humedad relativa al interior de la cámara de secado del prototipo durante los días de prueba.

En comparación a la gráfica anterior, la figura 18 presenta variabilidad en los datos de humedad relativa registrados en los días de prueba, dentro del gabinete de secado con convección natural. Se notó un intervalo de datos con humedad relativa mínima de 10% y máxima de 31%, descendiendo paulatinamente desde el inicio de la experimentación hasta alcanzar parámetros aceptables para el secado en el estado de Campeche, dos horas después, a diferencia del prototipo que lo logró a los 30 minutos.

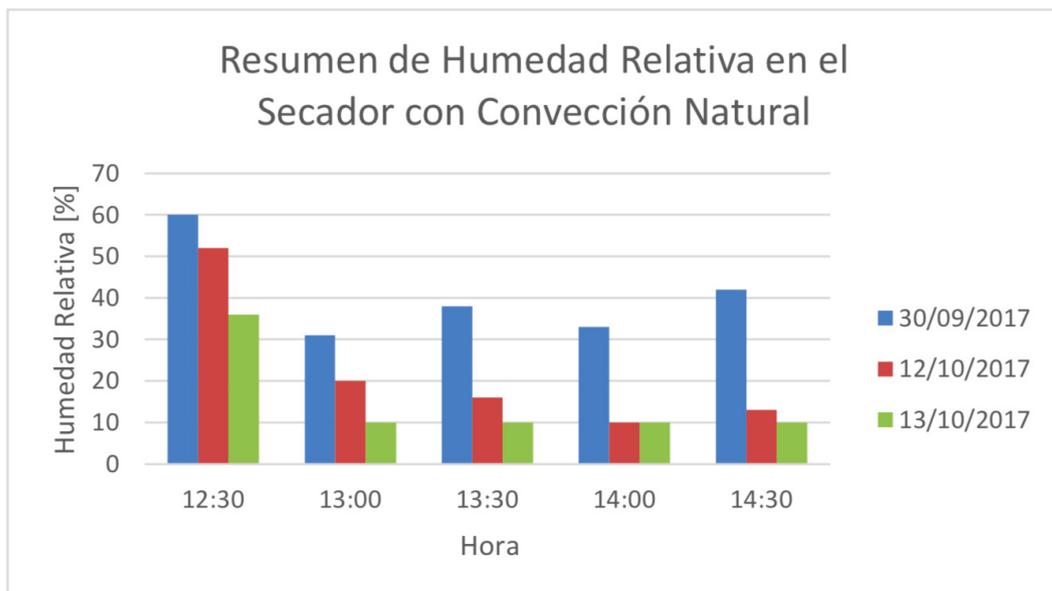


Figura 18. Gráfica de humedad relativa al interior de la cámara de secado por convección natural, durante los días de prueba.

La figura 19 muestra una dinámica inestable de la humedad relativa dentro del secador solar con convección forzada. Los valores de humedad relativa registrados oscilaron entre un mínimo de 18% y un máximo de 69%. Aún transcurridas dos horas de pruebas, no se alcanzaron los parámetros idóneos para el secado de alimentos en el estado de Campeche y el aire del ambiente se encuentra cercano a su límite de saturación, por lo que se requiere un aire de proceso con bajo nivel de humedad relativa (ideal entre 10 y 20%), para que cuente con la capacidad de extracción del líquido que contiene el producto a secar. El secado solar de gabinete con convección forzada, (por medio de un ventilador) aumenta la velocidad de flujo másico del aire atmosférico, éste resulta contraproducente al proceso de secado porque el aire ambiental que ingresa a la cámara de secado tiene alto nivel de humedad (75%), de tal suerte resulta en un método ineficaz de secado.

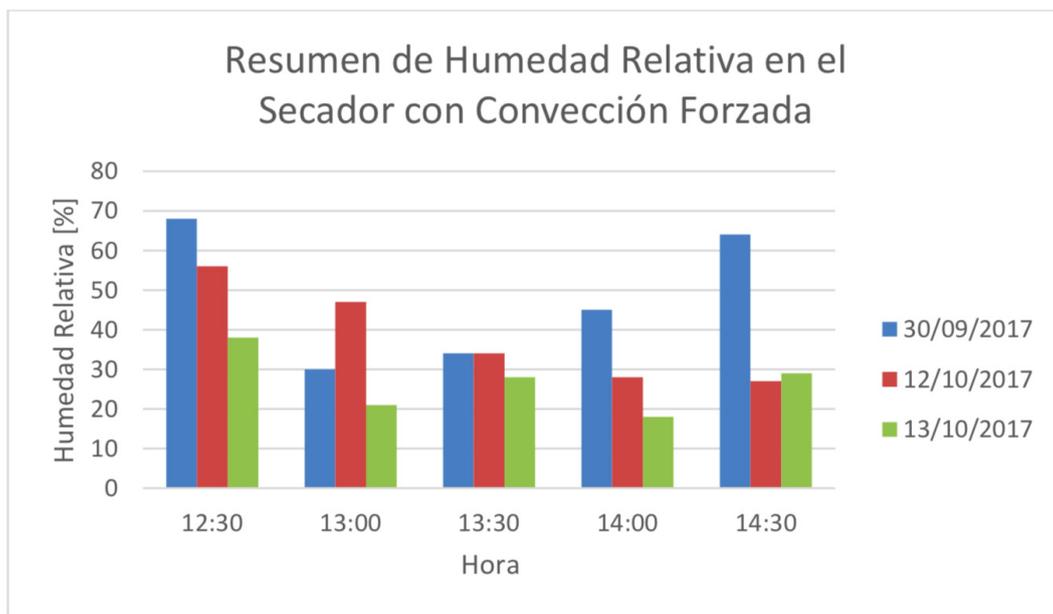


Figura 19. Gráfica de humedad relativa al interior de la cámara de secado por convección forzada, durante los días de prueba.

Una vez secadas las muestras de productos, fueron embolsadas por separado y etiquetadas según el método de secado: convección natural, convección forzada y prototipo; posteriormente, fueron sometidas a una instancia de observación. Transcurrido un mes desde las pruebas, las hojas secadas por medio del prototipo conservaban notablemente las características físicas conseguidas el día de prueba, en comparación con los otros métodos de secado.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó y construyó un prototipo de deshumidificación y calentamiento de aire para el secado solar en el estado de Campeche (clima cálido-húmedo). Los parámetros del aire de proceso para este prototipo mostraron una reducción en la humedad relativa de 75% a 10% de humedad relativa, y un incremento en la temperatura de 27°C a 60°C de temperatura.

El prototipo mostró estabilidad en los parámetros de humedad relativa y temperatura los días de prueba: 50-60°C y 10-20% (valores óptimos para el secado solar) e independencia de las condiciones meteorológicas. Así mismo, presentó la mayor reducción de masa del producto en menor tiempo de secado, en comparación con un secador solar de gabinete convencional

El dispositivo es apto para el secado de productos agroindustriales, pues de fácil instalación en zonas rurales y es alimentado con un sistema fotovoltaico autónomo.

6. Anexos

Anexo A. Condiciones meteorológicas en los días de pruebas experimentales

Las próximas figuras muestran las condiciones meteorológicas dadas los días de prueba, donde se observan el comportamiento de la humedad relativa (A1) y temperatura (A2) ambientales, así como de la irradiancia (A3).

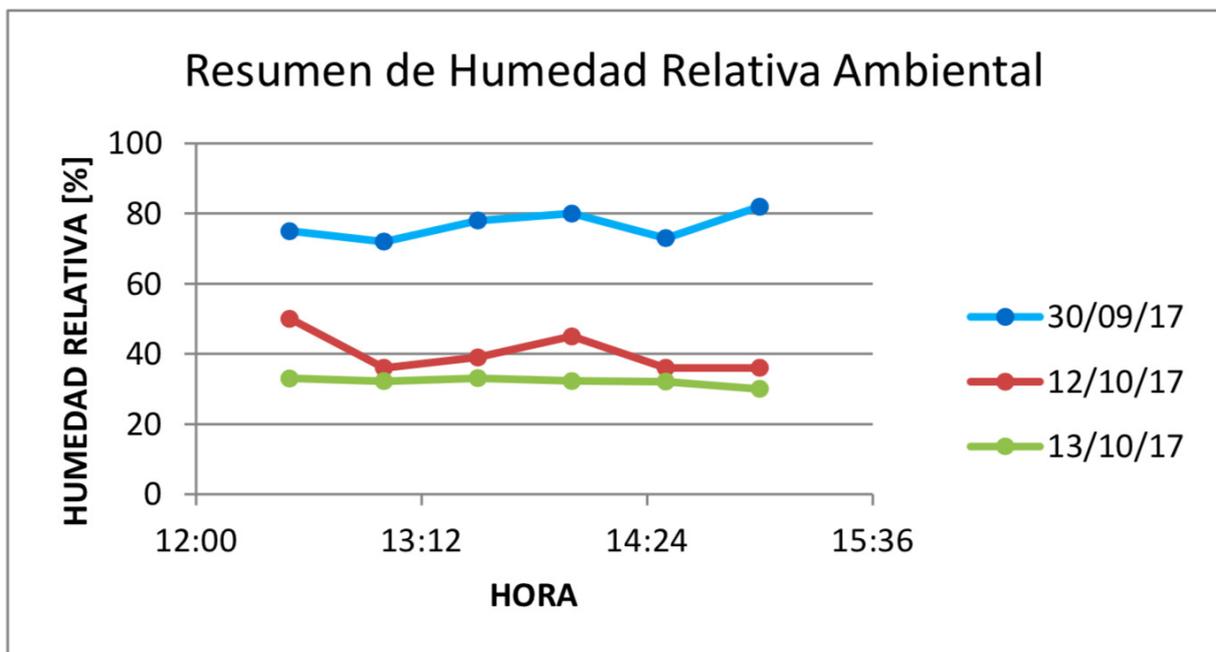


Figura A.1. Humedad relativa ambiental, durante los días de prueba.

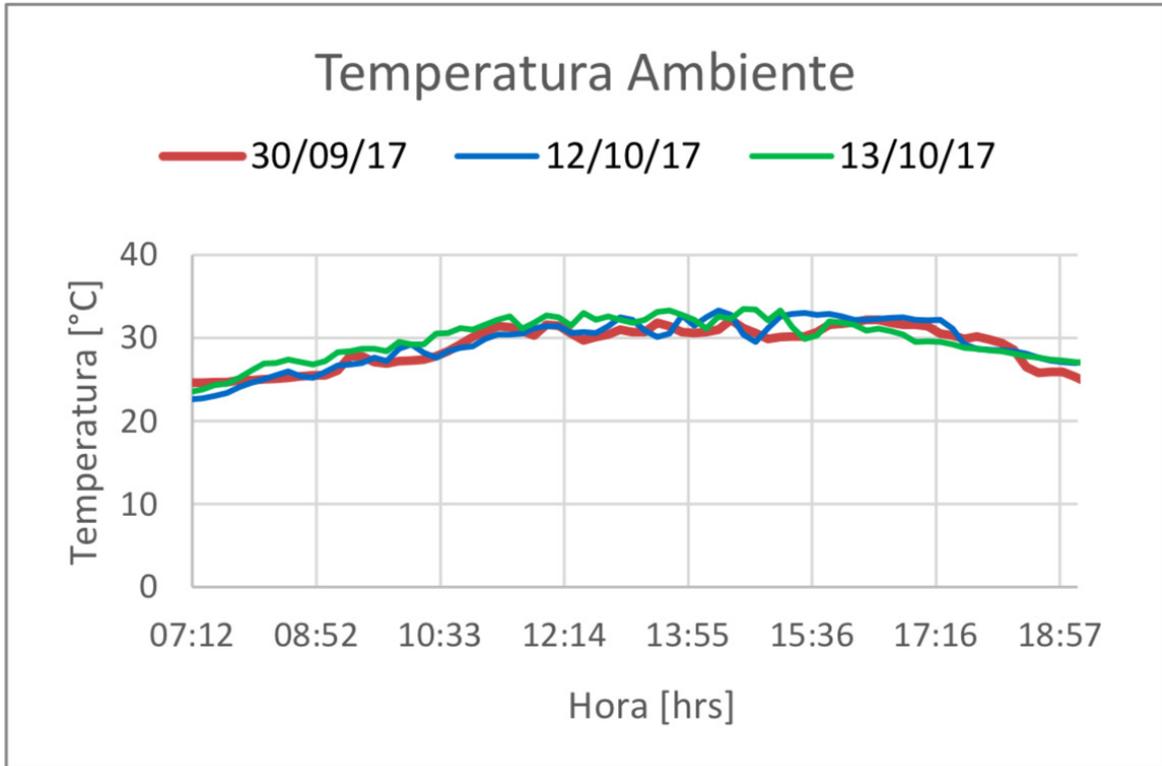


Figura A.2. Temperatura ambiental, durante los días de prueba.

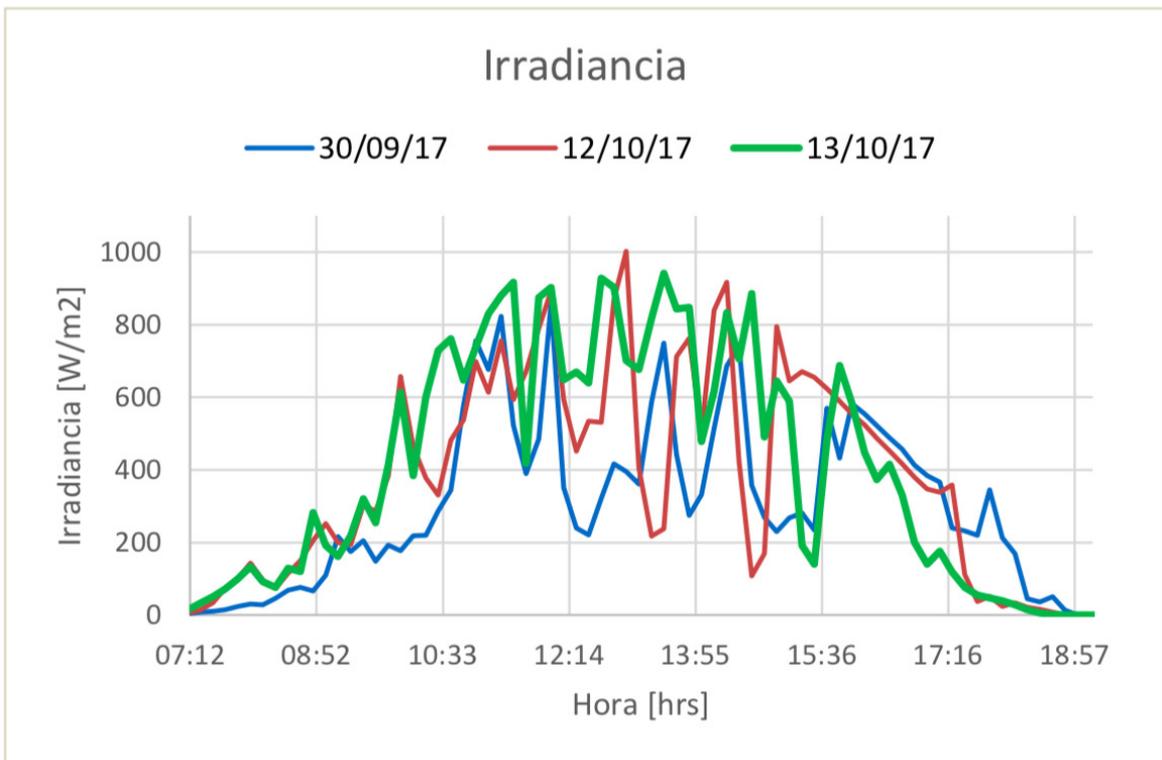


Figura A.3. Irradiancia, durante los días de prueba.

7. Referencias

[1] <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=04> INEGI 2015.

[2] U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory, 2010.

[3] R. Almanza S., E. Cajigal R., J. Barrientos A. 2000.

[4] Castillo Tellez M. (2016) Estudio de la deshidratación de las hojas de stevia (*Rebaudiana Bertoni*), bajo condiciones controladas y con un secador solar de tipo gabinete, Universidad Autónoma de Campeche.

[5] Chan González G. E., Construcción de un secador solar de tipo indirecto para la deshidratación de productos agrícolas, Universidad de Quintana Roo.

[6] Cortéz Calero C. P. (2014), Estudio de un secador solar indirecto por convección natural para el deshidratado de frutas y vegetales en Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

[7] Tagüeña, J., Ramírez, Y., & Pilatowsky Figueroa, I. (2013), Secador solar de alimentos (1st ed.). Terracota.

[8] Cengel Y., Michael A. Boles M. A., Termodinámica Octava edición, Mac Graw Hill.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN COLECTOR SOLAR

HÍBRIDO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO

Eduardo Venegas-Reyes¹, Mario Nájera Trejo², Mario Humberto González², Naghelli Ortega-Avila³, Norma Alejandra Rodríguez Muñoz³, Ignacio R. Martín-Domínguez², Jorge A. Escobedo-Bretado², Luis A. Calderón Torres⁴

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec Mor., 62550, México.

²Departamento de Tecnología Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, Durango, Dgo., 34106, México.

³CONACYT, Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV 110, Ejido Arroyo Seco, Durango, Dgo., 34106, México.

⁴Solarvatio S.A. de C.V., Calzada del Panteón 911, Col. San Felipe del Agua, Oaxaca de Juárez, Oax. 68020, México. eduardo.venegas@tlaloc.imta.mx

Resumen: En este trabajo se presenta la evaluación experimental de un colector solar híbrido térmico-fotovoltaico, desarrollado por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Durango) para la empresa Solarvatio S.A. de C.V., en el marco de la convocatoria de Estímulo Fiscal a la Investigación y Desarrollo Tecnológico (EFIDT). El diseño se basó en un panel fotovoltaico que fabrica dicha empresa, al cual se acopló un colector plano aletado en la parte posterior, con una configuración geométrica que le permite a los cabezales ajustarse al marco del panel fotovoltaico. Se probaron dos configuraciones, una con aletas en forma de omega adheridas al panel y con aislamiento térmico en la parte posterior y otra con el colector en contacto con el panel y sin aislamiento térmico. Para la primera configuración la curva de eficiencia tuvo un intercepto de 0.532, una pendiente de -26.339 y un decremento promedio de la potencia eléctrica de 2.31%; en la segunda configuración se tuvo un intercepto de 0.404, una pendiente de -34.234 y un incremento promedio de la potencia eléctrica de 8.85%. Los resultados muestran que es posible convertir los paneles fotovoltaicos en colectores híbridos térmico-fotovoltaicos de baja temperatura (< 40°C), cuyas aplicaciones principales se encuentran en la producción de energía eléctrica y calentamiento de albercas, granjas piscícolas, procesos de baja temperatura y precalentamiento.

Palabras clave: Colector híbrido, eficiencia instantánea, potencia eléctrica.

1. Introducción

En los últimos dos siglos, el uso de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades energéticas de nuestra sociedad ha incrementado la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera y esto ha aumentado la temperatura media de la Tierra, con el consecuente cambio climático. Una forma de reducir las emisiones de CO_2 es sustituyendo los combustibles fósiles mediante el uso de fuentes de energía renovable, siendo la solar la que tiene mayor potencial de aplicación, dado que es la fuente primaria de energía del planeta y, por lo tanto, la de mayor disponibilidad. Ahora bien, existen dos formas en las que se puede aprovechar la energía solar: de manera directa como térmica, o indirecta, transformándola en electricidad. Esto último se logra de dos maneras: por medio de la tecnología fotovoltaica, la cual utiliza celdas solares para convertir directamente la energía solar en energía eléctrica; o mediante un ciclo Rankine usando como fuente de calor la energía solar térmica.

Con respecto a la tecnología fotovoltaica, las celdas solares comerciales tienen una eficiencia eléctrica máxima de 25%, la cual disminuye con el aumento de temperatura que se presenta cuando la energía solar incidente se pierde como calor. A nivel mundial, se están haciendo esfuerzos para combatir este problema mediante el desarrollo de tecnologías solares híbridas térmico-fotovoltaicas, que permiten mantener una temperatura baja de los paneles solares y además aprovechar parte de la energía perdida como calor en aplicaciones de calentamiento a baja temperatura [1].

Existen algunas revisiones de los avances y aplicaciones de la tecnología híbrida fotovoltaica térmica, como en Sultan y Efsan (2018), quienes presentan y describen varios tipos de colectores FV-T: de aire, agua/aire y agua en términos de su diseño, desempeño construcción, simulación y evaluación experimental [2]; o en Aste et al. (2014), donde se realizó una revisión del estado del arte en colectores FV-T planos y se describen todos los tipos de configuraciones que existen para este tipo de colectores [1].

Otros estudios han enfocado sus esfuerzos en obtener diseños novedosos, por ejemplo, Hus-sain et al. (2015) estudió un colector híbrido FV-T para calentar aire, a través de un intercambiador de paneles hexagonales a lo largo del eje longitudinal del colector, y lo comparó con un sistema sin panel, que tuvo una eficiencia térmica de 27%, en contraste con el 87% del intercambiador de calor de panel, mientras que la eficiencia eléctrica mejoró 1% [3], por su parte, Daghigh y Khaledian (2017) desarrollaron un colector fotovoltaico térmico que usa dos fluidos de trabajo, en un serpentín circula agua y en el espacio que hay entre la parte posterior del panel y una tapa posterior se calienta aire [4].

Por otro lado, hay estudios que se concentran en el análisis teórico, el desarrollo de modelos matemáticos o la evaluación experimental de diferentes configuraciones de módulos FV-T, tal es el trabajo desarrollado en Fudholi et al. (2018), en donde se llevó a cabo el estudio de un colector FV-T con un acanalado en delta, se realizó el balance de energía en estado estacionario usando métodos analíticos y de matriz inversa y se hizo un análisis de exergía para obtener la eficiencia exergética, los resultados teóricos fueron consistentes con los resultados experimentales [5]. Por otra parte, en Koronaki y Nitsas (2017) se investigaron cinco colectores híbridos asimétricos con receptor plano de manera experimental y matemática a través de expresiones analíticas, la evaluación de los colectores se realizó en términos de la producción de energía y exergía bajo diferentes condiciones de operación [6]. En otro análisis, se estudió el comportamiento de colectores FV-T con paneles fotovoltaicos desmontables en

intercambiadores de calor y el efecto de espaciamentos macroscópicos de aire, se probaron dos prototipos con módulos de película delgada, y para comparar se construyó un prototipo con un intercambiador de calor de placa enrollada mejorando la eficiencia térmica; se usaron modelos numéricos en dos dimensiones para verificar las mediciones de eficiencia y determinar la influencia del diseño y las condiciones de frontera en los mecanismos de transferencia de calor de los colectores, las simulaciones tuvieron una buena aproximación a los resultados experimentales y probaron ser una herramienta efectiva para optimización del diseño [7]. En Hasan et al. (2018) se diseñó, construyó y evaluó de manera experimental un colector FV-T con un sistema de enfriamiento que lanza chorros de agua que impactan la parte posterior del módulo fotovoltaico, y se desarrolló un modelo matemático del colector FV-T que se comparó con datos experimentales con una exactitud de 95.8% para la eficiencia térmica y 99.6% para la eficiencia eléctrica [8]. En Jaaz et al. (2018) se presenta un estudio de los desempeños eléctrico y térmico de un colector parabólico compuesto FV-T, donde también se usó la técnica de chorros de agua para la remoción de calor de las celdas fotovoltaicas [9].

Algunos otros trabajos se focalizan en el análisis de las posibles aplicaciones, como es el caso de Shan et al. (2014) quienes presentan las evaluaciones del desempeño de colectores y sistemas fotovoltaico-térmicos (FV-T) con agua o aire como fluido de trabajo para varias aplicaciones, como integración de estos sistemas a edificaciones, sistemas de concentración y bombas de calor; ellos encontraron que el calentamiento de agua o aire permite reducir la temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos, lo cual mejora su eficiencia eléctrica [10]. Por su parte, Hischer et al. (2017), desarrollaron un colector ultra delgado (FV-T) que fue evaluado numéricamente y experimentalmente, con el objetivo de que se integrara fácilmente a las edificaciones, demostrando que el uso de celdas fotovoltaicas de película delgada permite tener un colector muy ligero ($< 4\text{kg/m}^2$), lo que simplifica su integración en edificios [11]. Huide et al. (2017) llevaron a cabo un estudio comparativo de las tecnologías fotovoltaica, solar térmica e híbrida FV-T, para predecir su desempeño en aplicaciones residenciales y determinar en qué situaciones es preferible cada tecnología o combinación de éstas, y para ello desarrollaron, simularon y validaron experimentalmente modelos para cada uno de los tres sistemas [12].

Finalmente, existen también algunas investigaciones que toman en cuenta también el aspecto económico, tal es el caso de Youssef et al. (2018), quienes analizaron el modelo numérico de un concentrador fotovoltaico-térmico (CFV-T) para evaluar su desempeño desde el punto de vista de energético y económico, tomando en cuenta la salida de potencia eléctrica y térmica, el modelo está basado en el balance de energía del receptor del CFV-T y sus resultados se compararon con datos experimentales, demostrando que se tiene una buena aproximación [13].

En este trabajo se llevó a cabo el diseño, construcción y evaluación experimental de un colector híbrido FV-T plano, usando como base el panel fotovoltaico SV-330 de 300W fabricado por la empresa Solarvatio.

2. Metodología

Se llevó a cabo el análisis de la transferencia de calor por medio de un programa de elemento finito, donde se analizaron tres niveles de radiación solar sobre el colector híbrido térmico-fotovoltaico. Poste-

riormente se realizó la evaluación experimental del colector, con el objetivo de determinar la eficiencia térmica del colector con y sin aislamiento térmico y su comportamiento eléctrico.

2.1. Modelo físico del colector

El colector híbrido FV-T desarrollado consiste en un arreglo de tubos que están adheridos a aletas y éstas a su vez a la parte posterior del panel fotovoltaico. En la figura 1 se puede ver que las aletas tienen forma de omega para poder acoplarse tanto a los tubos, como a la parte posterior del panel fotovoltaico.

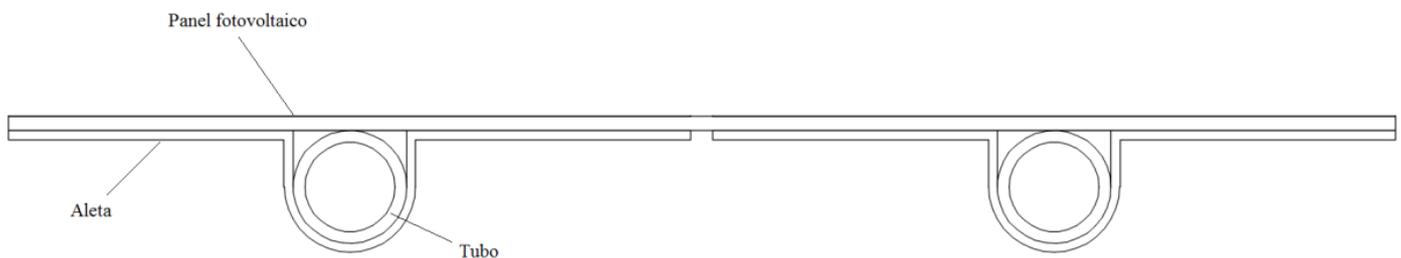


Figura 1. Configuración del colector FV-T.

2.2. Análisis de transferencia de calor

Para realizar el diseño se llevó a cabo un análisis en dos dimensiones de la transferencia de calor del colector hacia el agua, para lo cual se usó el programa de transferencia de calor por elemento finito FEHT [14]. En el modelo se hicieron las siguientes suposiciones:

- (1) La transferencia de calor es en estado estacionario.
- (2) El panel fotovoltaico se consideró como un solo elemento con una conductividad térmica promedio.
- (3) Existe un contacto térmico perfecto entre el panel fotovoltaico, la aleta, y el tubo por donde circula el agua.
- (4) La radiación incidente es normal al plano del colector.
- (5) La temperatura inicial del agua es de 25 °C.

Con el modelo desarrollado se llevaron a cabo simulaciones para tres niveles de irradiancia incidente en el colector: 800 W/m², 500 W/m² y 300 W/m².

En las gráficas de la Figura 2 se pueden observar los perfiles de temperatura para las diferentes intensidades de irradiancia solar. En el primer caso, Figura 2a, con radiación incidente de 800 W/m², se puede observar una distribución de temperaturas cuyo máximo valor fue de 50.94 °C en el panel

fotovoltaico, mientras que la mayor temperatura en el agua fue de $48.35\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el caso de la Figura 2b (radiación incidente de 500 W/m^2), la temperatura en el panel fue de $46.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la del agua de $42.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y finalmente, para el caso de la Figura 3c, donde la radiación incidente fue de 300 W/m^2 , la temperatura del panel fue de $43.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la mayor temperatura que alcanzó el agua fue de $37.82\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como era de esperarse, a mayor nivel de radiación se tiene una mayor temperatura en la unión entre el panel solar y la aleta, el calor entonces se transfiere al tubo, finalmente, al fluido de trabajo.

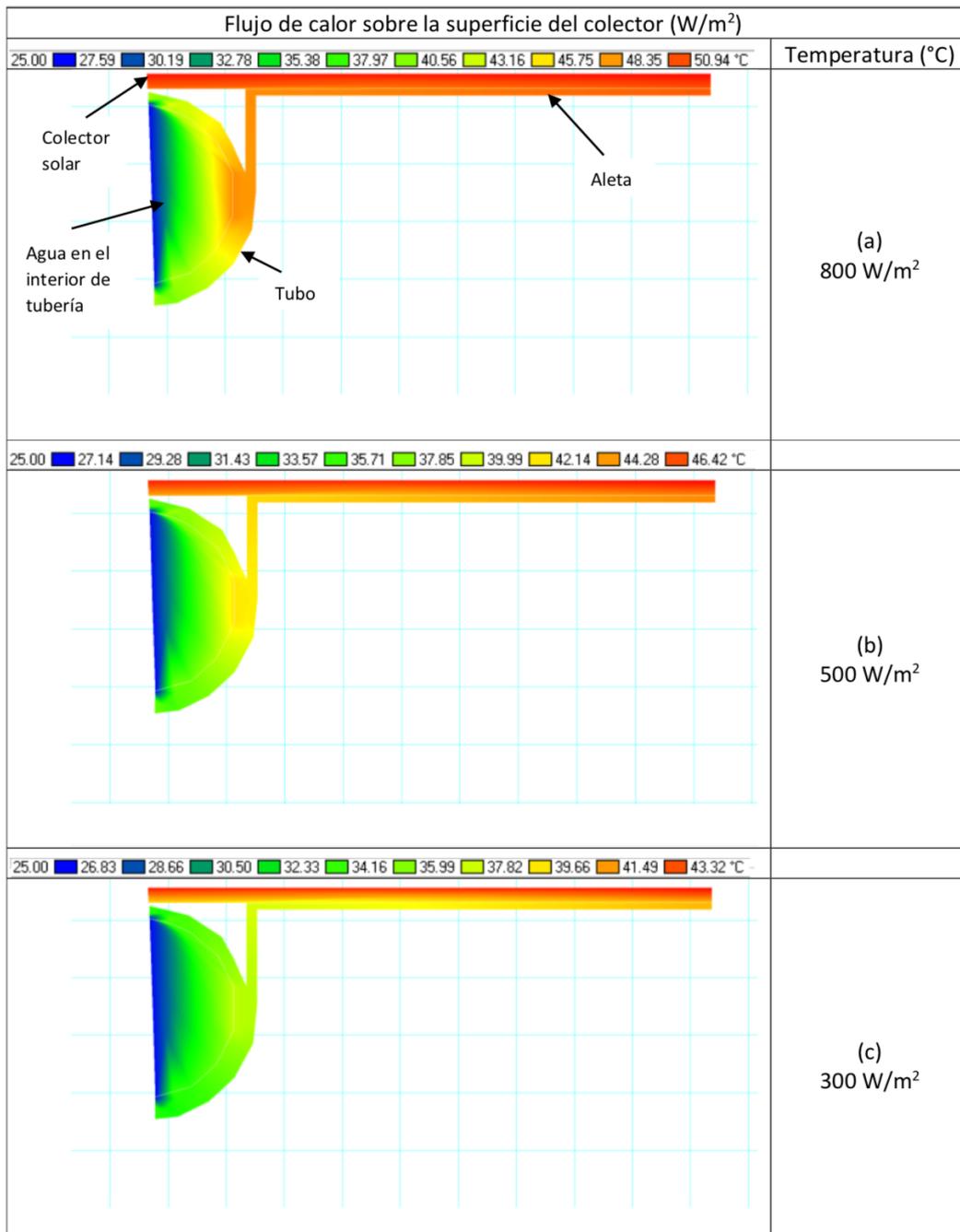


Figura 2. Distribución de temperatura en una sección del colector para irradiación incidente de: (a) 800 W/m^2 , (b) 500 W/m^2 y (c) 300 W/m^2 .

2.3. Evaluación experimental

Adicionalmente se realizó la evaluación experimental del colector FV-T y para ello, se comparó su comportamiento eléctrico con el de un módulo fotovoltaico de referencia con las mismas características que el usado en dicho colector, donde se conectaron resistencias con valores conocidos y se midió el voltaje en las terminales para poder calcular la corriente que circula por éstas y determinar la potencia producida. En la figura 3 se muestra el esquema del sistema de evaluación experimental compuesto por un circuito hidráulico, un termo tanque con una resistencia para calentamiento, una bomba, una válvula de control de flujo, un caudalímetro (F), termopares para medir temperatura ambiente (T_a) y temperatura del agua a la entrada (T_e) y a la salida del colector (T_s), un piranómetro con la inclinación del colector, y un sensor de velocidad del viento. Todos los sensores se conectaron a un adquisidor de datos.

Las pruebas que se llevaron a cabo consistieron en recircular el agua a través del colector FV-T, con el uso de una resistencia eléctrica (RC) de 9 kW con control de temperatura (CT), de tal manera que la temperatura del agua a la entrada del colector FV-T se incremente y se pueda obtener una gráfica en función de $(T_e - T_a)/G$. El termotanque que se usó en el sistema de evaluación es de 300 L, sin embargo, solo se llenó hasta 150 L para que su temperatura se incrementara en un tiempo menor. Al inicio de cada evaluación térmica se conectó una resistencia de 22.5Ω a las terminales eléctricas y al módulo fotovoltaico de referencia una resistencia de 22.8Ω . En la figura 4 se puede ver el sistema de evaluación experimental para el colector FV-T y el módulo FV de referencia.

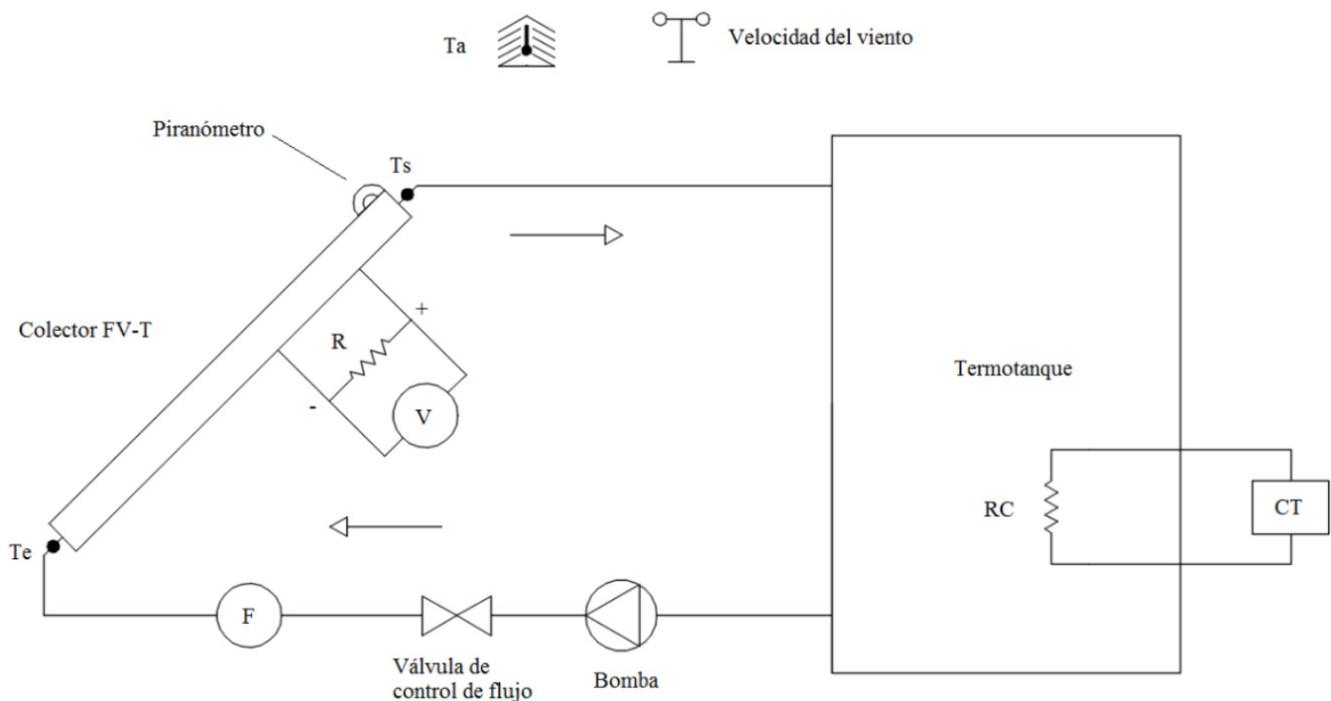


Figura 3. Sistema de evaluación experimental del colector FV-T.



Figura 4. Evaluación experimental del colector FV-T y módulo FV de referencia.

2.4. Determinación de eficiencia térmica

La eficiencia térmica de un colector solar está dada por el calor útil que entrega el colector solar entre la energía que recibe el colector y está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{GA_c} \quad (1)$$

Donde η_T es la eficiencia térmica instantánea del colector, \dot{m} es el flujo másico, C_p es el calor específico del fluido de trabajo, en este caso agua, T_e y T_s son, respectivamente, la temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector FV-T, G es la irradiancia solar y A_c es el área de apertura del colector.

El calor útil también se puede definir como [15]:

$$Q_u = F_R A_c [\eta_o G - U_L (T_e - T_a)] \quad (2)$$

Donde Q_u es el calor útil obtenido por el colector solar, F_R es el factor de remoción, η_o es la eficiencia óptica y U_L es el coeficiente global de pérdidas del colector. Sustituyendo esta ecuación en (1) se obtiene:

$$\eta_T = F_R \left[\eta_o - \frac{U_L}{G} (T_e - T_a) \right] \quad (3)$$

Que tiene la forma de la ecuación de la recta: $y = mx + b$, por lo tanto, a partir de los datos experimentales se puede hacer una regresión lineal para obtener la curva de eficiencia térmica del colector. Esta curva permite conocer el desempeño del colector en función de la temperatura de operación y la temperatura ambiente.

3. Resultados

La evaluación experimental del colector FV-T se llevó a cabo en la ciudad de Durango en el mes de marzo de 2018. Se probaron dos tipos de configuraciones para el colector FV-T: una fue el colector con aletas adheridas a la parte posterior del módulo fotovoltaico con aislamiento térmico de fibra de vidrio con un espesor de 5 cm, la otra fue usando una cinta de aluminio adhesiva para unir los tubos de cobre a la parte posterior del módulo fotovoltaico y sin aislamiento térmico.

3.1. Colector FV-T con aislamiento térmico

Esta prueba se llevó a cabo el día 7 de marzo de 2018, se inició con una temperatura del agua del tanque de 25.6 °C y se recirculó el agua con un flujo másico de 0.2 kg/s con la resistencia RC encendida para calentar el agua de forma más rápida. El incremento de temperatura inicial fue de 1.44 °C y el final de 0.5 °C. En la figura 5 se pueden observar las mediciones en el colector FV-T de: la temperatura ambiente T_a , y las temperaturas del agua a la entrada T_e y a la salida T_s , respectivamente. Se puede observar que hay un incremento de T_s con respecto a T_e , y se observa también la irradiancia G durante el periodo de prueba. El incremento de temperatura fue disminuyendo conforme aumentó la temperatura del agua a la entrada del colector FV-T.

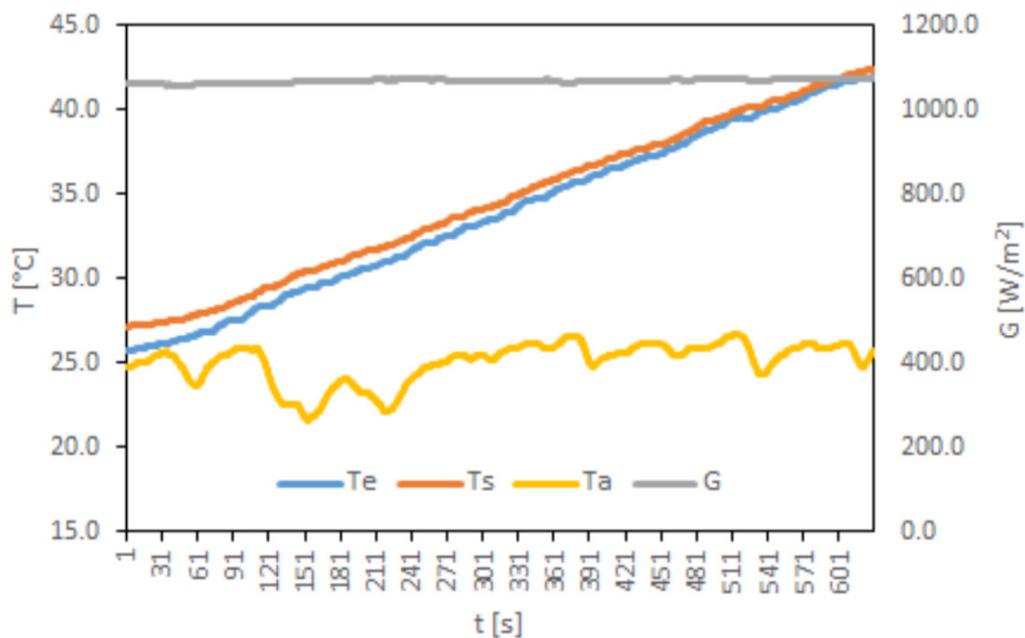


Figura 5. Mediciones de temperaturas y radiación para el colector FV-T con aislamiento.

En la figura 6 se pueden observar los datos de eficiencia obtenidos en función de $(T_e - T_a)/G$, mediante una regresión lineal, se puede observar una pendiente de -26.339 y un intercepto de 0.5317. Las pérdidas hacia el ambiente son altas debido a que no se cuenta con una cubierta de vidrio en la parte superior del colector.

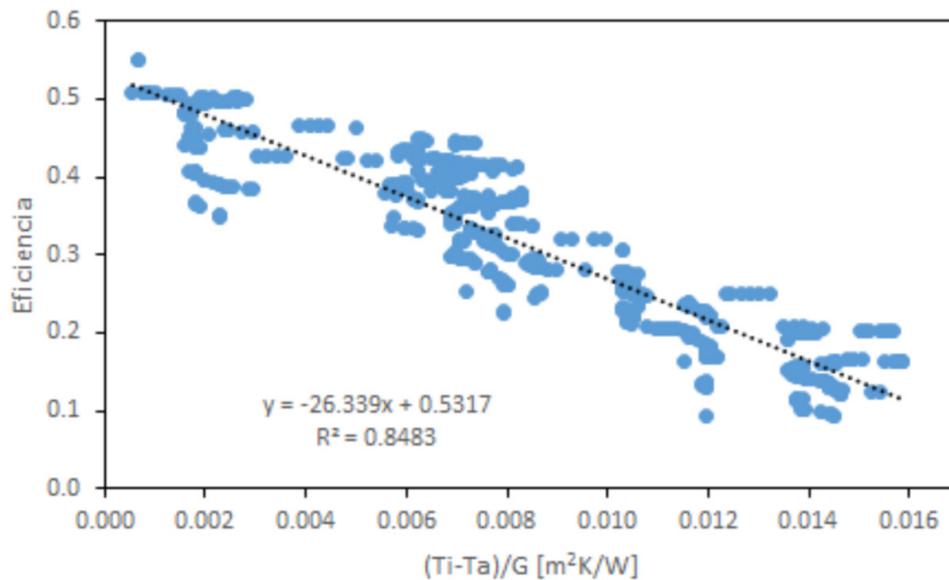


Figura 6. Datos y curva de ajuste de eficiencia térmica para el colector FV-T con aislamiento térmico.

En la figura 7 se indican las potencias eléctricas de salida para el colector FV-T (P. FV-T) y para el módulo FV de referencia (P. FV), donde se observa que hubo un decremento en la salida de potencia del colector FV-T con respecto al módulo FV de referencia, el mínimo fue de 1.24% y el máximo fue de 4.02%. Para obtener el decremento se resta la potencia del colector FV-T de la del módulo solar de referencia, por lo que si da un valor positivo es que hubo un decremento. Este decremento puede deberse a que, al estar aislada la parte posterior del módulo, no se está permitiendo la disipación del calor hacia la atmósfera y el incremento de temperatura está disminuyendo la eficiencia eléctrica.

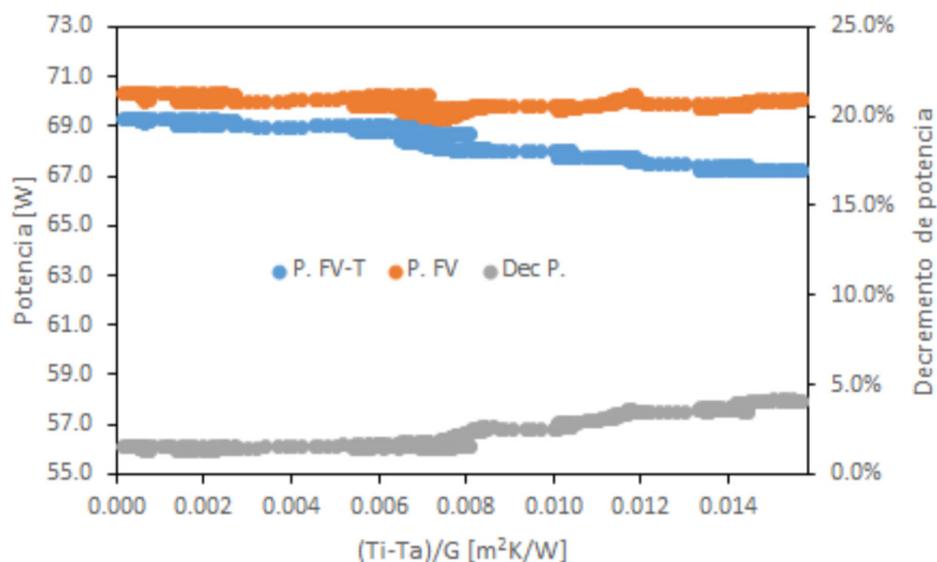


Figura 7. Decremento de potencia del colector FV-T con aislamiento térmico con respecto al módulo FV de referencia.

3.2. Colector FV-T con cinta y sin aislamiento térmico

Esta prueba se llevó a cabo el día 21 de marzo de 2018, se inició con una temperatura del agua del tanque de 22.03 °C y se recirculó el agua con un flujo másico de 0.2 kg/s, con la resistencia RC encendida para calentar el agua más rápidamente. En la figura 8 se observó un comportamiento similar de las variables medidas con respecto a la Figura 5. El incremento de temperatura inicial fue de 2.12 °C y el final de 0.21 °C. Se puede observar que hay un incremento de T_s con respecto a T_e , y se muestra también la irradiancia G durante el periodo de prueba. El incremento de temperatura fue disminuyendo conforme aumentó la temperatura del agua a la entrada del colector FV-T.

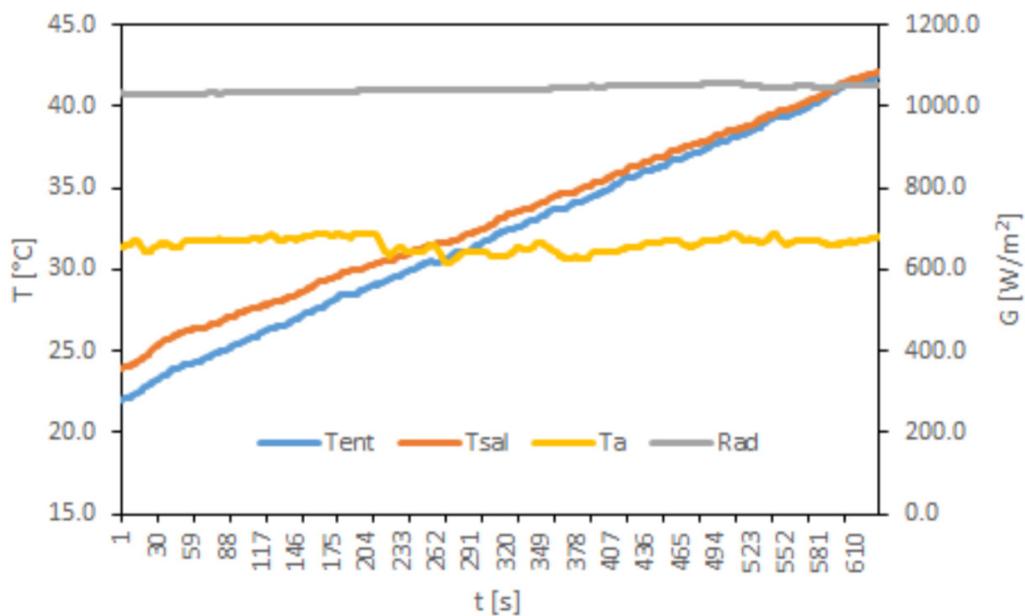


Figura 8. Mediciones de temperaturas y radiación para el colector FV-T sin aislamiento.

En la figura 9 se observan los datos de eficiencia obtenidos en función de $(T_e - T_a)/G$, donde se tiene una pendiente de -34.234 y un intercepto de 0.4036. Las pérdidas de calor son más grandes que en el caso del colector FV-T con aislamiento, esto se debe a que hay pérdidas tanto en la cara frontal, como en la posterior del colector.

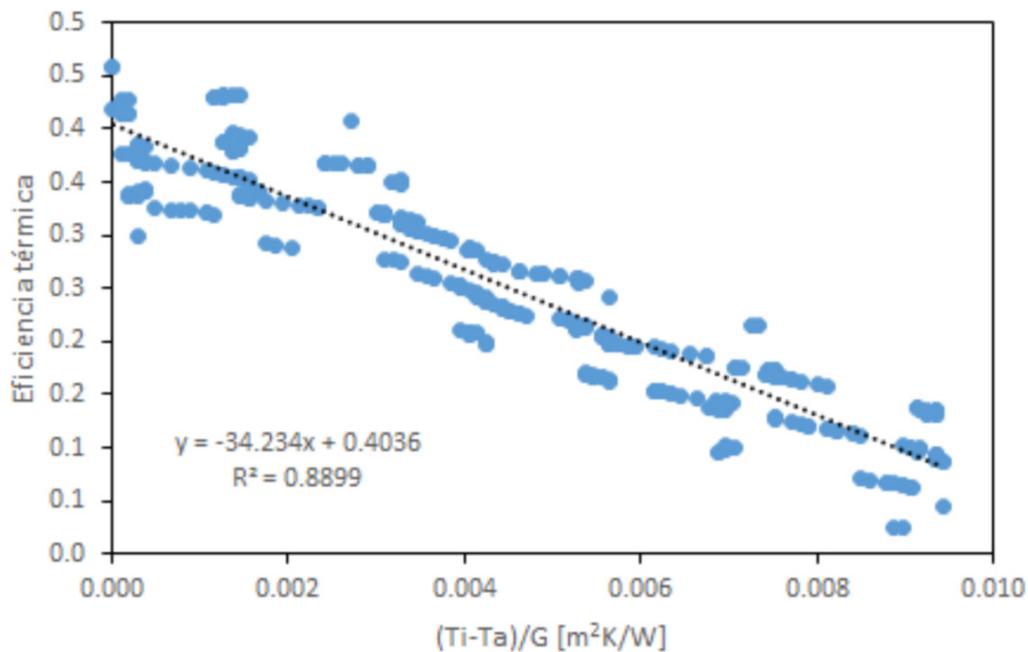


Figura 9. Datos y curva de ajuste de eficiencia térmica para el colector FV-T sin aislamiento térmico.

En la figura 10 se observó que la potencia eléctrica P. FV-T se incrementó con respecto a la potencia P. FV del módulo de referencia. En este caso se nota un decremento negativo, el menor fue de -9.88% y el mayor de -7.7%, lo cual quiere decir que mejoró el desempeño eléctrico del colector FV-T. Así, aunque las pérdidas térmicas son más altas y la eficiencia óptica es más baja que en el caso del colector FV-T con aislamiento térmico, el colector térmico está permitiendo mantener más baja la temperatura del módulo fotovoltaico, lo cual mejora su eficiencia eléctrica.

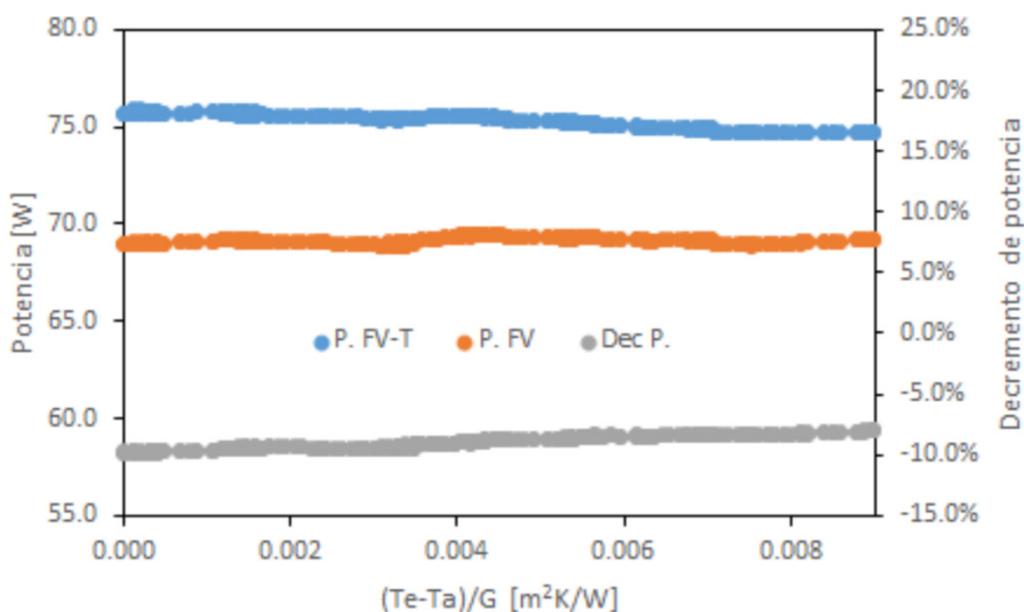


Figura 10. Decremento de potencia del colector FV-T sin aislamiento térmico con respecto al módulo FV de referencia.

4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados experimentales se observó que la eficiencia térmica fue mejor en el colector FV-T con aislamiento térmico con respecto del colector FV-T sin aislamiento. Esto se debe a que hubo menores pérdidas térmicas hacia el ambiente gracias al aislamiento térmico, sin embargo, la potencia eléctrica se vio disminuida por el incremento de temperatura en las celdas FV del colector FV-T, con respecto al modulo FV de referencia.

En el caso del colector con cinta de aluminio y sin aislamiento térmico, se mostró un incremento significativo en la potencia eléctrica en comparación con módulo FV de referencia debido a que la remoción de calor fue mejor ya que hubo un contacto térmico mejor. Sin embargo, se observó que la eficiencia térmica disminuyó, esto se debe a que hubo mayores pérdidas térmicas hacia el ambiente.

En el colector FV-T se encontró que el contacto mecánico y térmico fue deficiente por lo que queda como trabajo futuro mejorar este contacto y evaluar el colector con un contacto mejorado y aislamiento térmico. Se pueden volver a comparar los dos colectores con aislamiento térmico para ver cuál tiene mejor desempeño, tanto eléctrico, como térmico.

5. Agradecimientos

Al proyecto 1006 de la convocatoria de Estímulo Fiscal a la Investigación y Desarrollo de Tecnología CONACYT-EFIDT 2017 por el estímulo fiscal otorgado a la empresa Solarvatio. Al Ing. Ismael Hernández Landeros por su apoyo en la construcción y evaluación experimental del prototipo.

6. Referencias

- [1] N. Aste, C. del Pero, F. Leonforte, "Water flat plate PV-thermal collectors: A review", *Solar Energy*, 102, 98-115 (2014).
- [2] S.M. Sultan, M.N. Ervina Efzan, "Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications", *Solar Energy*, 173, 939-954 (2018).
- [3] F. Hussain, M.Y.H. Othman, B. Yatim, H. Ruslan, K. Sopian, Z. Anuar, S. Khairuddin, "An improved design of photovoltaic/thermal solar collector", *Solar Energy*, 122, 885-891 (2015).
- [4] R. Daghigh, Y. Khaledian, "Design and fabrication of a bi-fluid type photovoltaic-thermal collector", *Energy*, 135, 112-127 (2017).
- [5] A. Fudholi, M. Zohri, G.L. Jin, A. Ibrahim, C.H. Yen, M.Y. Othman, M.H. Ruslan, K. Sopian "Energy and exergy analyses of photovoltaic thermal collector with ∇ -groove", *Solar Energy*, 159, 742-750 (2018).
- [6] I.P. Koronaki, M.T. Nitsas, "Experimental and theoretical performance investigation of asymmetric Photovoltaic/Thermal Hybrid Solar Collectors Connected in Series", *Renewable Energy*, 118, 654-672 (2018).
- [7] S. Brötje, M. Kirchner, F. Giovannetti, "Performance and heat transfer analysis of uncovered photovoltaic-thermal collectors with detachable compound", *Solar Energy*, 170, 406-418 (2018).
- [8] H.A. Hasan, K. Sopian, A. Fudholi, "Photovoltaic thermal solar water collector designed with a jet collision system", *Energy*, 161, 412-424 (2018).
- [9] A.H. Jaaz, K. Sopian, T.S. Gaaz, "Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal collector-compound parabolic concentrated", *Results in Physics*, 9, 500-510 (2018).
- [10] F. Shan, F. Tang, L. Cao, G. Fang, "Performance evaluations and applications of photovoltaic-thermal collectors and systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 467-483 (2014).
- [11] I. Hischer, J. Hofer, L. Gunz, H. Nordborg, A. Schlüter, "Ultra-thin lightweight photovoltaic/thermal collectors for building integration", *Energy Procedia*, 122, 409-414 (2017).

[12] F. Huide, Z. Xuxin, M. Lei, Z. Tao, W. Qixing, S. Hongyuan, "A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems", *Energy Conversion and Management*, 140, 1-13 (2017).

[13] W.B. Youssef, T. Maatallah, C. Menezob, S.B. Nasrallaha, "Modeling and optimization of a solar system based on concentrating photovoltaic/thermal collector", *Solar Energy*, 170, 301-313 (2018).

[14] <http://www.fchart.com/feht/>

[15] John A. Duffie, William A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes* (John Wiley & Sons, Inc, 2013), Chap. 6.

DESARROLLO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA RECUBRIMIENTOS DE ABSORCIÓN SOLAR UTILIZANDO LUZ ARTIFICIAL CONCENTRADA

Leopoldo Martínez Manuel ^a, Manuel I. Peña Cruz ^{b,*}, Carlos A. Pineda Arellano ^b, J. Gonzalo Carrillo Baeza ^c

^a Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, CP 20200, Aguascalientes, Aguascalientes, México

^b CONACYT – Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, CP 20200 Aguascalientes, Aguascalientes, México.

^c Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Materiales, Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Chuburná de Hidalgo, CP 97205 Mérida, Yucatán, Mexico

* Corresponding author: mippec@cio.mx

Resumen: El estudio de materiales para el aprovechamiento del recurso solar es un tema de interés actual en la investigación de los sistemas de energía solar concentrada. Uno de los componentes más críticos de esta tecnología son los receptores solares debido a la alta irradiancia a la que deben operar. Un diseño apropiado de las propiedades óptico-térmicas de los receptores termosolares permite mejorar su rendimiento y vida útil. Este trabajo presenta el diseño de un banco de pruebas para el análisis del rendimiento térmico de materiales selectivos de aprovechamiento termosolar utilizando como fuente de luz concentrada un Simulador Solar de Alto Flujo Radiativo (SSAFR). Este banco medirá la capacidad de transferencia de calor a un fluido de trabajo típico utilizando recubrimientos de absorción selectiva bajo condiciones controladas de laboratorio. El diseño consiste de un ensamble de acero maquinado por donde circula un fluido de trabajo. El banco de pruebas es instrumentado con termopares para medir la temperatura de entrada y salida del fluido (calorímetro). El diseño cuenta con un hueco cónico de 100 mm de diámetro en donde el recubrimiento bajo prueba queda expuesto a la radiación concentrada y está construido con materiales comúnmente usados en receptores solares como el aluminio, cobre y acero inoxidable. El estudio de transferencia de calor es realizado mediante un balance térmico con los datos del flujo radiativo y las temperaturas monitoreadas por termopares. El estudio del rendimiento óptico-térmico de recubrimientos selectivos bajo condiciones reales de energía concentrada proporciona información sobre la capacidad de transferencia de energía que pueden ofrecer dichos materiales y abre la posibilidad de mejorar la eficiencia de esta tecnología.

Palabras clave: Banco de pruebas, Simulador Solar, Transferencia de calor, Balance térmico.

1. Introducción

Los sistemas de aprovechamiento solar son un recurso invaluable para poder satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad moderna. Además, estas tecnologías se han desarrollado en los últimos años debido al interés creciente en la investigación en estos sistemas para elevar su producción y que puedan competir con fuentes de energía basadas en combustibles fósiles [1].

Las tecnologías termosolares se basan en el concepto de concentración de la radiación solar mediante espejos o superficies altamente reflejantes. Dichos materiales reflectores direccionan a la luz concentrada sobre un receptor para producción de vapor o aire caliente, los cuales pueden ser utilizados para la generación de electricidad [2]. En ese sentido los componentes que tienen un mayor rol en la eficiencia de captación solar son el sistema de concentración y el de absorción de energía (receptor). Los dispositivos ópticos que direccionan a la radiación solar gracias a su geometría y superficie especular han sido estudiados y desarrollados hasta alcanzar hoy en día niveles de reflexión de más del 90% [3]. En cuanto a la parte absorbidora que corresponde a los receptores, es un tema que está en proceso de desarrollo. La eficiencia de conversión de energía solar a térmica es determinada principalmente por las propiedades ópticas de la superficie absorbidora y el estudio para su mejora es prioritario.

Los receptores solares generalmente son tubos o placas planas fabricados de materiales como el cobre o el aluminio, los cuales presentan una gran conductividad térmica con puntos de fusión que van de los 500°C a los 2000°C. Para elevar los niveles de absorción de estos materiales se requiere de la aplicación de un recubrimiento altamente absorbente en el espectro solar UV-Vis-NIR. Pintura negra mate resistente a altas temperaturas es comúnmente aplicada sobre receptores, obteniendo niveles de absorción de solo el 30% de la energía recibida [4]. Una superficie selectiva eficiente en conversión foto-térmica debe tener una alta absorción que abarque el rango del espectro solar (0.25-3 μ m), además de una baja emitancia, la cual representa pérdidas debido a la reemisión en longitudes de onda larga [5]. En la actualidad existen recubrimientos selectivos que alcanzan niveles de absorción de hasta el 90% [6,7]. Pero los costos de importación para su aplicación en prototipos repercuten en la accesibilidad del producto.

Con base en lo anterior, se identifica la necesidad de realizar investigación a nivel laboratorio del rendimiento óptico-térmico de materiales receptores (recubrimientos) en cuanto a la capacidad de transferencia de calor a un fluido de trabajo típico. Para llevar a cabo esta tarea, se requiere de la implementación de un banco de ensayos para pruebas a materiales termosolares, el cual permita realizar experimentos bajo condiciones similares y controladas a diversas muestras para su valoración.

Un dispositivo que permite realizar investigación de energía solar concentrada en condiciones controladas de flujo radiativo y temperatura es un Simulador Solar de Alto Flujo Radiativo (SSAFR). Este dispositivo ofrece una disponibilidad de uso sin restricción de horarios además de una fuente de luz solar artificial debido al uso de lámparas de arco de xenón, las cuales presentan un espectro similar al espectro solar terrestre [8-10].

En el CIO, en su Unidad Aguascalientes, se cuenta con un SSAFR de 17.5 kWe (Figura 1) compuesto de 7 lámparas de arco corto de xenón [11]. Este dispositivo fue desarrollado para el estudio de materiales de aprovechamiento solar y será utilizado en conjunto con el banco de ensayos para estudiar la interacción de los recubrimientos con la radiación bajo condiciones controladas.



Figura 1. Simulador Solar de Alto Flujo de 17.5 kWe desarrollado en el CIO-Aguascalientes [11].

2. Metodología

El simulador solar utilizado en este estudio cuenta con 7 lámparas de arco corto de xenón de 2.5 kWe acoplados a reflectores elipsoidales truncados con distancia focal de 2000 mm. Información técnica sobre el simulador solar puede ser encontrada en [11]. El banco de pruebas para recubrimientos de absorción solar estará acoplado al punto focal del simulador solar de alto flujo (Figura 2) y tendrá la capacidad de intercambiar muestras (placa adicionada con un recubrimiento). El banco de pruebas se compone de una pieza maquinada de acero inoxidable a la cual se le adhiere una abertura cónica en su parte frontal de 100 mm de diámetro. En esta abertura, la cual coincide en diámetro con el spot de flujo del SSAFR, quedará expuesta la muestra de estudio. El banco de pruebas es instrumentado con termopares para medir la temperatura de entrada y salida del fluido a manera de un calorímetro especializado [12]. La eficiencia óptica-térmica de un material de aprovechamiento solar puede ser estudiada y estimada a partir del equilibrio termodinámico utilizando una de las variaciones de la ley de Kirchhoff para la radiación térmica [13]. Esta ley nos ayuda a deducir expresiones concretas para calcular el flujo de calor efectivamente transmitido entre dos cuerpos. Con ello la absorptancia espectral α puede ser definida en términos de la reflectancia total $\rho(\lambda, \phi)$ para materiales opacos (Ecuación 1).

$$\alpha = 1 - \rho(\lambda, \phi) \quad (1)$$

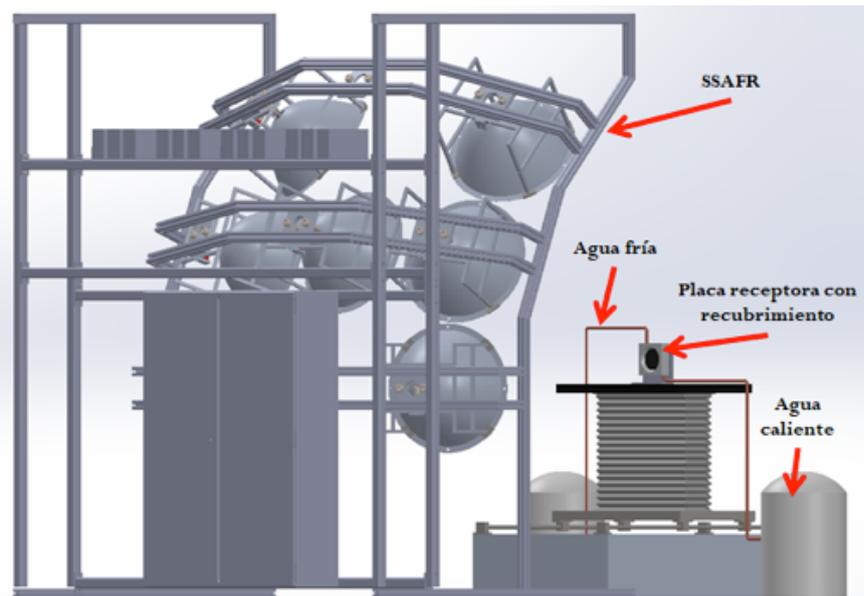


Figura 2. Diseño de banco de pruebas acoplado al SSAFR con el que se realizarán experimentos a materiales absorbedores selectivos.

Donde $\rho(\lambda, \phi)$ es la suma de la reflectancia difusa y colimada, λ la longitud de onda de la radiación, ϕ es el ángulo de incidencia de la radiación a una temperatura T del cuerpo bajo estudio. Su emitancia $\varepsilon(T)$ puede ser analizada mediante una curva de cuerpo negro dada por la Ecuación 2:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \{[1 - \rho(\lambda, T)] B(\lambda, T)\} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (2)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y $B(\lambda, T)$ es la irradiancia espectral de cuerpo negro dada por:

$$B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1]} \quad (3)$$

Donde C_1 y C_2 son las constantes radiativas de Planck [13].

Con el diseño de este calorímetro y la previa caracterización de flujo radiativo del SSARE, se medirá la cantidad de energía absorbida por los materiales bajo prueba mediante la medición de las temperaturas de entrada y salida de un fluido de trabajo [12]. Con ello se logrará realizar un balance térmico (Ecuación 4) que permitirá determinar la eficiencia de absorción de los distintos materiales bajo estudio. Estimando una gran absorptancia y baja emitancia de energía sobre la superficie de estudio, pérdidas convectivas debido al ambiente pueden ser descartadas.

$$Q_{abs} = \dot{m}C_{pf}(Tf_{out} - Tf_{in}) \quad (4)$$

Donde Q_{abs} es la energía absorbida por la placa acondicionada con recubrimiento, \dot{m} es el flujo másico, C_{pf} es el calor específico del fluido, Tf_{out} y Tf_{in} son las temperaturas de entrada y salida del fluido al banco de pruebas.

Dichas temperaturas del fluido serán monitoreadas mediante termopares de tipo probeta (RTD). Para analizar las señales de salida de los termopares, así como el flujo radiativo de las lámparas, se utilizará un Datalogger CR-300 series, de Campbell Scientific® con precisión de medición de voltaje de $\pm 0.1\%$. Los materiales a utilizar en este estudio serán placas maquinadas de acero inoxidable 304, aluminio 1100 (punto de fusión $\sim 650^\circ\text{C}$), cobre C-1100; maquinadas con dimensiones de 5 x 100 x 100 mm. Para obtener resultados preliminares, se utilizará como material absorbente pintura negro mate resistente a altas temperaturas (650°C).

La eficiencia de absorción se define como la razón entre el calor removido por el fluido (energía absorbida Q_{abs}) y la energía incidente sobre la placa Q_{in} . La energía incidente es calculada previamente mediante la caracterización del SSAFR con el uso de sensores de flujo radiativo y técnicas de mapeo de flujo [11]. Para el cálculo de la eficiencia que cada recubrimiento y sustrato metálico pueden alcanzar se utiliza la Ecuación 5:

$$\eta_{abs} = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}} \quad (5)$$

Donde η_{abs} es la eficiencia de absorción de calor; con ello se evaluará al correcto diseño en el banco de pruebas y la eficiencia obtenida con cada una de las placas de prueba.

Relacionado a la implementación de recubrimientos sobre receptores metálicos, se pretende identificar la metodología que permita una buena adhesión del sustrato al receptor, además de resultar relativamente simple en aplicación y económica. En este estudio se pretenden utilizar técnicas como el “blade coating” la cual es una técnica de bajo costo y es no contaminante comparada con métodos tradicionales más complejos como el Sputtering o el PVD (Physical Vapor Deposited) [14]. En cuanto al análisis de la estructura molecular y química de la muestra bajo estudio, se emplearán técnicas como la espectroscopia Raman y diversos equipos con los cuales cuenta este centro de investigación como lo es la Difracción por Rayos Equis (XRD) y Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) [15].

3. Desarrollo

Se realizó el diseño de un banco de pruebas para materiales absorbentes solares; la Figura 3 muestra el diseño CAD realizado. El diseño consiste de una pieza cuadrática a la cual se le agregó una abertura cónica para ayudar a una mayor concentración de flujo. La abertura tiene un diámetro de 100 mm en la que queda expuesta la placa de prueba adicionada con una pintura negro mate. En el interior se tiene una extrusión de corte en el material para formar canales por los cuales circule el fluido de refrigeración y que esté en constante contacto con la superficie trasera de la placa absorbente. Se le acondicionaron tubos de cobre de 1/2 in (12.7mm) de diámetro interno para la entrada y salida del fluido, así como una

bomba para la circulación del líquido de trabajo y tanques para contener al fluido de entrada a temperatura ambiente y al fluido caliente que sale del sistema.

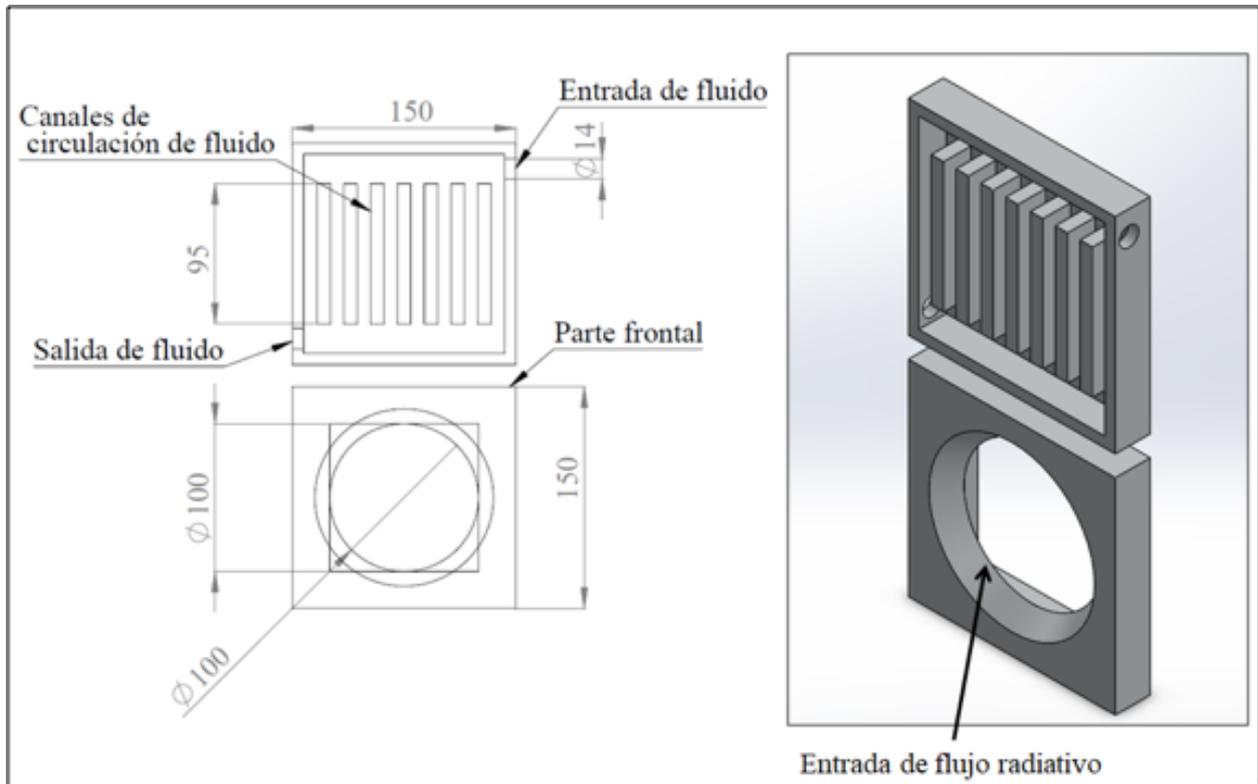


Figura 3. Diseño CAD del calorímetro para la medición de la transferencia térmica de la muestra bajo estudio al fluido de trabajo (unidades en milímetros).

La Figura 4 muestra un diseño alternativo del banco de pruebas para análisis de materiales absorbentes; en este caso la placa absorbidora no está en contacto directo con el fluido de trabajo. En este diseño, pasta térmica entre la placa de prueba y el ensamble de circulación del fluido será adherida para obtener mejor transferencia térmica. Para obtener un buen aislamiento térmico entre la cara frontal del calorímetro y los materiales absorbentes, se agregará una placa rígida de lana de roca con temperaturas de uso máxima de 650°C. Este material presenta una conductividad térmica 0.0424 W/mK a una temperatura de 100°C. Las placas de prueba cubiertas con el absorbedor solar son fijadas con tornillos para un mejor contacto con la placa de enfriamiento (circulación del fluido). De esta forma se tiene versatilidad en el análisis de transferencia de calor al fluido debido al fácil intercambio de muestras. La Figura 5 presenta el esquema del banco de pruebas con los componentes para la determinación del flujo al cual circula el fluido, la presión dentro del sistema y la diferencia de temperaturas de entrada y salida ΔT .

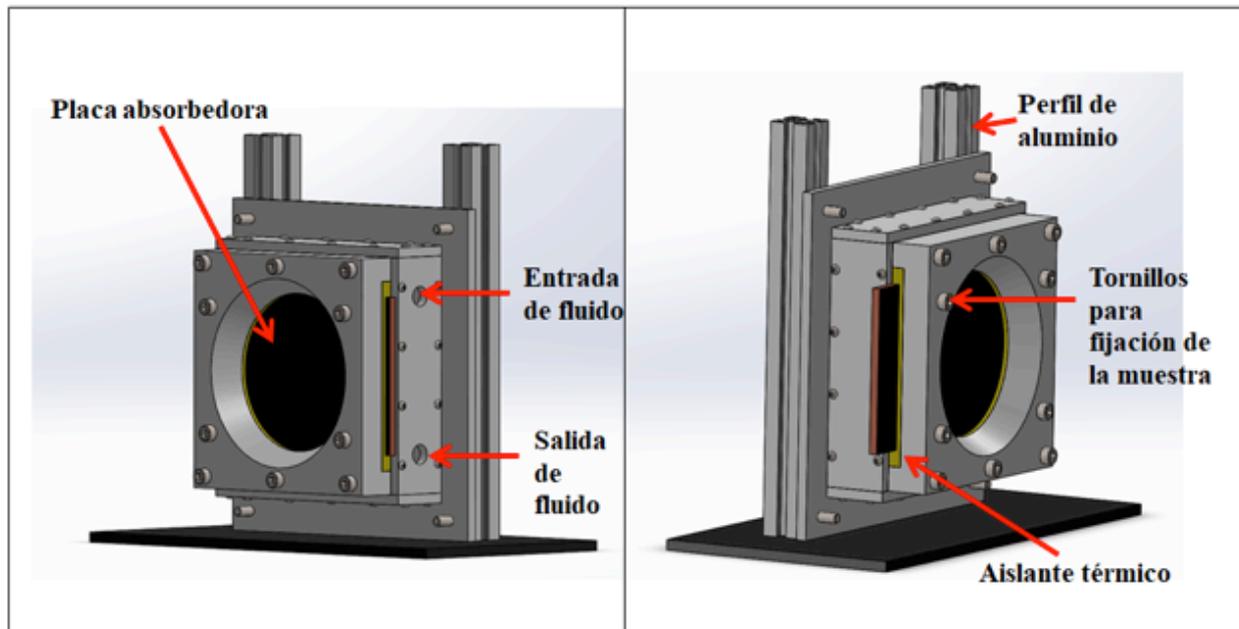


Figura 4. Diseño CAD alternativo del calorímetro para la medición de la transferencia térmica. En este diseño la placa de prueba no está en contacto directo con el fluido de trabajo.

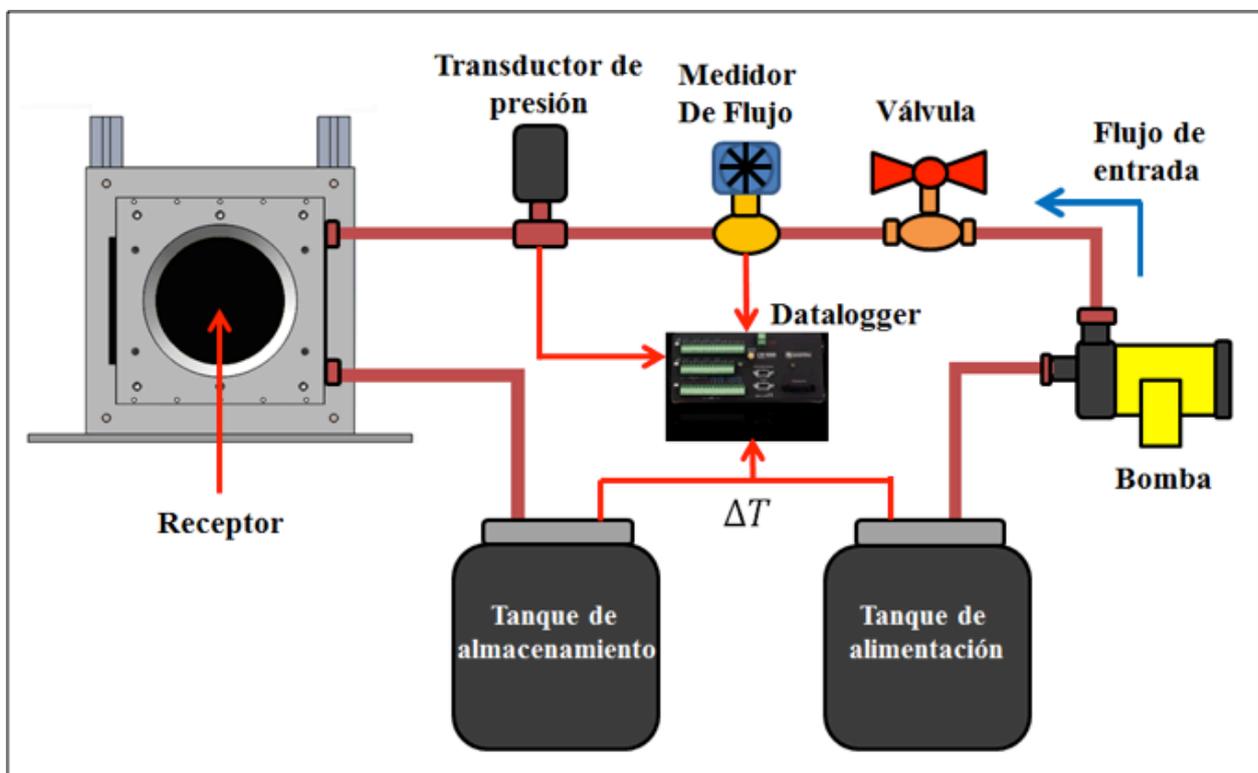


Figura 5. Esquema del banco de pruebas para recubrimientos de absorción solar.

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño de un banco de pruebas para materiales de aprovechamiento solar como los utilizados en receptores solares en conjunto con recubrimientos de absorción selectiva. Se mostró un diseño del banco de ensayos donde el material absorbedor solar está en contacto directo con el fluido de trabajo. Un diseño alternativo fue también presentado en el que la placa de pruebas es insertada en la parte lateral y fijada sobre la placa de enfriamiento por donde circula el fluido. Con ello se tendrá la versatilidad de intercambiar muestras para realizar experimentos bajo las mismas condiciones de prueba y poder llevar a cabo la comparativa en eficiencia de transferencia de calor al fluido. El análisis bajo condiciones reales de energía concentrada proporciona información del rendimiento óptico-térmico que ofrecen materiales absorbedores solares dando la posibilidad de mejorar la eficiencia y tiempo de vida de esta tecnología.

5. Bibliografía

- [1] Crabtree, George W., and Nathan S. Lewis, "Solar energy conversion." *Physics today* 60.3 (2007): 37-42.
- [2] Müller-Steinhagen, Hans, and Franz Trieb, "Concentrating solar power." *A review of the technology. Ingenia Inform QR Acad Eng* 18 (2004): 43-50.
- [3] McCord KM, Klinglesmith D, Jurgensona C, Bakker EJ, Schmell R, Schmell D., "Characterization of Silver and Aluminum custom mirror coatings for the MRO interferometric telescopes." *Optical Materials and Structures Technologies IV. Vol. 7425. International Society for Optics and Photonics, 2009, p. 74250V*
- [4] INTI: <https://www.inti.gob.ar/e-renova/erSO/er32.php>
- [5] Uhuegbu, Chidi C., "Photo-thermal solar energy conversion device." *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 2.1 (2011): 96-101.
- [6] TiNOX®. <http://www.almecogroup.com/>
- [7] AlanodSolar®. <http://www.sunselect.de/>
- [8] Bader, Roman, Sophia Haussener, and Wojciech Lipiński, "Optical design of multisource high-flux solar simulators." *Journal of Solar Energy Engineering* 137.2 (2015): 021012.
- [9] Wang, W., Aichmayer, L., Garrido, J., & Laumert, B., "Development of a Fresnel lens based high-flux solar simulator." *Solar Energy* 144 (2017): 436-444.
- [10] Gallo, A., Marzo, A., Fuentealba, E., & Alonso, E., "High flux solar simulators for concentrated solar thermal research: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017): 1385-1402.
- [11] Martínez-Manuel, L., Peña-Cruz, M. I., Villa-Medina, M., Ojeda-Bernal, C., Prado-Zermeño, M., Prado-Zermeño, I., Prado-Zermeño, C.A., Pineda-Arellano, J.G., Carrillo, I., Salgado-Tránsito, & Martell-Chavez, F., "A 17.5 kW el high flux solar simulator with controllable flux-spot capabilities: Design and validation study." *Solar Energy* 170 (2018): 807-819.
- [12] Estrada, C. A., Jaramillo, O. A., Acosta, R., & Arancibia-Bulnes, C. A., "Heat transfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measurements." *Solar energy* 81.10 (2007): 1306-1313.
- [13] Modest, Michael F., *Radiative heat transfer* (Elsevier, 2013), Chap. 3.
- [14] Heras, I., Krause, M., Abrasonis, G., Pardo, A., Endrino, J. L., Guillén, E., & Escobar-Galindo, R., "Advanced characterization and optical simulation for the design of solar selective coatings based on carbon: transition metal carbide nanocomposites." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 157 (2016): 580-590.
- [15] Gao, X. H., Guo, Z. M., Geng, Q. F., Ma, P. J., & Liu, "Structure, optical properties and thermal stability of TiC-based tandem spectrally selective solar absorber coating." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 157 (2016): 543-549.

T

Mario Nájera-Trejo, Jorge A. Escobedo-Bretado, Luis F. García-Godina, Ignacio R. Martín-Domínguez

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados – Unidad Durango
mario.najera@cimav.edu.mx*

Resumen: Históricamente, las primeras aplicaciones de sistemas de calor solar para procesos industriales fueron las de baja temperatura, actualmente estas constituyen el 90% de las instalaciones. Por otra parte, el desarrollo de tecnologías ha hecho más accesibles y eficientes estos sistemas, por lo que los procesos de baja temperatura ya no son exclusivos para la industria, y son encontrados tanto en la agroindustria y en el comercio como en aplicaciones de uso doméstico.

El Sistema de Calentamiento Agua/Aire Multipropósito (SCAAM), tiene como finalidad la caracterización y validación de equipos tales como, colectores solares, tanques de almacenamiento térmico, intercambiadores de calor, entre otros. Así mismo, tiene la capacidad de soportar pruebas experimentales instrumentadas para prototipos de procesos industriales que requieran una caracterización energética, para procesos de calentamiento como: deshidratación, pasteurización, esterilización, entre otros. El SCAAM permite movilidad y modularidad de sus componentes, es decir, diferentes configuraciones termo-hidráulicas mediante la versatilidad de su diseño especializado para la variación del número y tipo de colectores solares, conexión serie/paralelo, volumen de almacenamiento, flujos máxicos de agua o aire, fuente y capacidad de energía auxiliar, entre otros.

En este trabajo se presentan resultados del diseño mecánico, térmico e hidráulico así como los avances en la integración física del sistema.

Palabras clave: *Simulación, Diseño, Sistema de calentamiento, Solar, Plataforma de pruebas, Termo-hidráulica.*

1. Introducción

Actualmente la industria consume cerca del 31% de la energía a nivel nacional, de la cual más del 60% es utilizada en forma de calor para procesos industriales (1,119 PJ) [1], estas industrias pueden clasi-

ficarse por la temperatura requerida en sus procesos; en calor de alta temperatura ($T > 250^{\circ}\text{C}$), media ($100^{\circ}\text{C} < T < 250^{\circ}\text{C}$), o baja ($T < 100^{\circ}\text{C}$) [2].

Existe la posibilidad de suplir esta demanda con energía solar, a las plantas que utilizan esta tecnología para sus procesos se les conoce como plantas SHIP por sus siglas en inglés, se estima que en México existe una capacidad instalada de 11,472 kWt distribuidos en 43 instalaciones solares en un área total de 17,446 m² [1].

Aunque las plantas SHIP pueden ser de giros diversos (Textil, celulosa, química y farmacéutica, automóvil, manufactura, acerera, cementera) [3] la mayor parte de las instalaciones en México se encuentran en plantas de la industria alimenticia [2] y estas requieren en su mayoría calor de baja temperatura.

Existe todavía un amplio margen de implementación de tecnologías SHIP, sin embargo, entre los problemas comunes que limitan a las industrias de utilizar energía solar están el retorno de la inversión, el valor presente neto pero principalmente, la fiabilidad técnica de la tecnología solar [1]. El sector industrial en particular, requiere de certidumbre para el ininterrumpido funcionamiento de sus procesos. Dicha certidumbre se puede lograr a través del desarrollo de proyectos de ingeniería diseñados mediante software de simulación dinámica, esto para tener la posibilidad de analizar el comportamiento de equipos de captación termo solar bajo las condiciones de años típicos de operación.

Para el diseño de plantas SHIP se utilizan diferentes métodos, los más utilizados son los programas computacionales que por su versatilidad permiten variaciones paramétricas [3] algunos enfoques son por medio de simulaciones de elemento finito, modelos de eficiencia de segundo orden y modelados computacionales [4].

TRNSYS utiliza modelos matemáticos e información técnica de los diferentes equipos para simular el funcionamiento de sistemas integrados, por ejemplo para los colectores solares se debería contar con la ecuación de eficiencia, así como el efecto del ángulo de incidencia de la radiación sobre el colector [5].

Actualmente en el mercado nacional, se encuentran pocos equipos para la implementación de proyectos SHIP como lo son los colectores solares, que cuenten con una ficha técnica. Por otra parte existe la necesidad de la caracterización energética de prototipos de procesos. Para ello es indispensable contar con bancos de pruebas que tengan la capacidad de caracterizar equipos termo-hidráulicos como: colectores solares, tanques de almacenamiento, calderas, prototipos de captación solar y por otra parte prototipos de procesos. Este trabajo presenta una propuesta de diseño mecánico, hidráulico y de simulación, para la construcción de un Sistema de Calentamiento de Agua/Aire Multipropósito (SCAAM).

2. Antecedentes

Se realizó una recopilación de información técnica sobre colectores solares comercialmente disponibles a nivel nacional, que además estuvieran caracterizados térmica e hidráulicamente. La tecnología objetivo fue la utilizada para aplicaciones de baja temperatura ($< 100^{\circ}\text{C}$), esto debido a que CIMAV actualmente ya cuenta con una plataforma de pruebas para media temperatura (100°C a 250°C). En particular los colectores solares de placa plana y de tubos evacuados con cabezal fueron las tecnologías objetivo a investigar en el mercado nacional. Dicha búsqueda estuvo fundamentada en los organismos de certi-

ficación como “Solar Rating & Certification Corporation” (SRCC), “DIN CERTCO” y la “Solar Keymark. El programa de certificación de colectores solares térmicos de la SRCC OG-100 proporciona la certificación de los colectores térmicos solares a la norma ICC 901 / SRCC 100, que hace referencia a los métodos de prueba internacionalmente aceptados en la norma ISO 9806. El programa de certificación de la DIN CERTCO en su norma Internacional especifica métodos de prueba para evaluar la durabilidad, fiabilidad y seguridad de los colectores de calefacción de fluidos según la ISO 9806-2013. Esta búsqueda demostró que existe un mercado nacional muy limitado en la distribución y venta de equipos certificados. Una vez identificados los equipos, se recabaron los datos técnicos y económicos necesarios para incorporarlos a simulación dinámica, para su análisis técnico económico. Por motivos de confidencialidad de las marcas analizadas, se decidió asignar un nombre arbitrario a cada uno de los distintos colectores, solo se especifica entre paréntesis el tipo de colector de Placa Plana (PP) o Tubos Evacuados (TE).

3. Metodología

El sistema de calentamiento agua/aire multipropósito tiene como finalidad la caracterización térmica de dispositivos, así como de procesos térmicos. Este consta de un conjunto de dispositivos que pueden ser interconectados entre sí y que tienen el propósito de formar una plataforma de pruebas versátil, para la caracterización y validación de equipos termo-hidráulicos tales como: colectores solares, intercambiadores de calor, prototipos de captación solar, sistemas de almacenamiento térmico, entre otros. Así mismo tiene la capacidad de soportar pruebas experimentales instrumentadas para prototipos de procesos industriales que requieran una caracterización energética, para procesos de calentamiento como: deshidratación, pasteurización, esterilización entre otros. El SCAAM permite movilidad de sus componentes, así como diferentes configuraciones hidráulicas mediante la versatilidad de su diseño especial para la variación del número y tipo de colectores solares, conexión serie/paralelo, volumen variable de almacenamiento, flujos máxicos de agua o aire, fuente y capacidad de energía auxiliar, entre otros.

3.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico se basa en la modularidad y versatilidad de la configuración hidráulica, esto con el fin de tener la posibilidad de variar el número de elementos que componen el sistema y el arreglo hidráulico con el que se interconectan. Este diseño fue conceptualizado utilizando perfiles de aluminio extruido de la marca Bosch Rexroth los cuales ofrecen robustez, resistencia a la corrosión y flexibilidad en el diseño. Una vez conceptualizado el diseño con estos materiales, se realizó el diseño CAD mediante el software SolidWorks. Ahí se realizaron diversas pruebas de análisis de esfuerzos mecánicos sometiendo las diferentes monturas a esfuerzos de carga por peso y viento.

De las fichas técnicas obtenidas para los colectores solares disponibles en el mercado nacional, se extrajeron las dimensiones correspondientes a cada modelo. Se tomaron en cuenta las dimensiones de todos los modelos encontrados para su posible inclusión en el sistema. Por otra parte el diseño se realizó tomando en cuenta la adaptación del ángulo de inclinación desde 0° hasta 90° mediante el uso de seis articulaciones (Diseño industrial por registrar).

3.2 Diseño Termo-hidráulico

Se propuso la utilización de simulación dinámica para el diseño térmico, mediante el software TRNSYS, por otra parte para el diseño hidráulico se propuso el uso del software Pipe Flow Expert. Este diseño se conceptualiza en cuatro bloques principales; el de captación solar, almacenamiento, intercambio de calor y energía auxiliar. Adicionalmente el diseño de captación solar considera una variación en el arreglo hidráulico serie y paralelo. El arreglo serie y/o paralelo considera la variación en el flujo másico que cada arreglo hidráulico requiere. Se utiliza una bomba para la recirculación de los colectores solares al almacenamiento térmico. Los arreglos hidráulicos considerados en el sistema son serie, paralelo y arreglos mixtos. Una parte importante del sistema de captación solar es que puede incrementarse o disminuir en su capacidad, variando el número de colectores y cambiando el arreglo hidráulico. Lo anterior es posible lograrlo de una manera práctica mediante terminales de acoplamiento hidráulico rápido, instalados en todos los elementos termo-hidráulicos del SCAAM.

3.3 Simulación

3.3.1 TRNSYS

La simulación térmica se realiza utilizando TRNSYS 17 y fue conceptualizada de manera que pudiera modificarse su configuración hidráulica para elegir los distintos modelos de colectores solares. Los colectores de tubos evacuados fueron simulados utilizando el Type 71, que contiene un modelo matemático ajustable que contempla la información experimental de ángulos modificadores transversales y longitudinales [5]. Por otra parte el modelo utilizado para los colectores de placa plana fue el Type 1b, que contiene un modelo matemático para colectores de placa plana con eficiencias térmicas de tipo cuadráticas [5]. La simulación considera el análisis de ocho colectores solares de diferente modelo en donde por cuestiones de confidencialidad se identifican con letras griegas y por el tipo de colector solar. La selección del modelo de colectores solares a simular se realiza mediante una válvula diversora de una entrada y múltiples salidas en donde se controla el flujo másico del fluido de trabajo. Para la selección del modelo de colector solar a simular se utiliza el Type 647 que corresponde a la válvula diversora de múltiples salidas, esta válvula se controla por medio de valores fraccionales en cada salida, respetando el balance de materia entre la entrada y sus "n" salidas. La bomba de recirculación se simula utilizando el Type 114, esta bomba es controlada por una condición matemática GT por sus siglas en inglés "Greater than", en la cual se establece que por encima de una radiación global de 55 W/m^2 se activa el bombeo. A diferencia de las simulaciones hidráulicas, la simulación térmica en esta etapa del proyecto, no contempla almacenamiento térmico ya que solo se contabiliza la ganancia de energía partiendo de una temperatura constante.

· Parámetros de simulación

Para simular en TRNSYS el comportamiento de los colectores es necesario conocer todas las variables que influyen en su operación, así como las características del equipo para su modelado matemático. Los datos climáticos fueron tomados del programa Meteonorm, el cual es un generador de datos meteorológicos que integra una base de datos exhaustiva tomada de estaciones meteorológicas alrededor del planeta. El formato de datos utilizado corresponde al TMY-2.

El Angulo de inclinación para las superficies de los colectores considera el mismo valor que el de la latitud del lugar a analizar. Para el colector solar de tubos evacuados (Type 71), se deben considerar los IAM (Ángulos Modificadores de incidencia) transversales y longitudinales en diferentes ángulos. Los IAM se colocan en la simulación por medio de un archivo externo elaborado en un block de notas (con extensión .dat). Este archivo debe contener los resultados de una matriz en la cual se multiplican los diferentes valores de los IAM Transversales y longitudinales en distintos ángulos. En este ensayo los valores de IAM de los tres colectores de tubos evacuados se extrajeron de las fichas técnicas y hojas de certificación.

Los parámetros utilizados para el modelado de los colectores consideran los obtenidos de los mecanismos certificadores como la “Solar rating & certification corporation”, “DIN CERTCO” y “Solar keymark Certificate”.

3.3.2 PIPE FLOW EXPERT

La simulación hidráulica se realiza utilizando Pipe Flow Expert v7.40 en la cual es posible determinar el desempeño hidráulico en estado estable, como por ejemplo, las caídas de presión en el sistema y con esto calcular la capacidad de la bomba necesaria a utilizar para la construcción física del sistema. La simulación considera arreglos hidráulicos de cuatro colectores en serie, cuatro colectores en paralelo y un arreglo mixto de dos por dos colectores, de las cuales las dos últimas consideran retorno inverso. El fluido de trabajo proviene de un tanque de almacenamiento y descarga en otro tanque de almacenamiento separado del primero. Otra consideración es que la cantidad de almacenamiento se considera ilimitada, por lo que el tamaño de los termotanques no influye en el cálculo.

4. Resultados

Como resultado de la búsqueda de mercado, se encontraron ocho modelos de colectores solares que cuentan con una caracterización térmica, que pueden ser utilizados en la industria y que son distribuidos a nivel nacional. Cinco de estos colectores solares son de tipo placa plana y tres colectores solares son de tubos evacuados con cabezal. La simulación de estos colectores a lo largo de un año entregó la energía útil por cada uno de los modelos analizados, como se muestra en la Fig. 1.

Entre otros resultados de simulación, está la obtención de la cantidad de energía útil anual dividida por el costo de cada tipo de colector como se muestra en la Fig. 2. Entre estas dos gráficas se observa una diferencia en el orden ascendente debido a la inclusión de costos. Lo que indica una fuerte influencia de los costos de importación, que al final impactaran en el análisis de factibilidad técnica-económica.

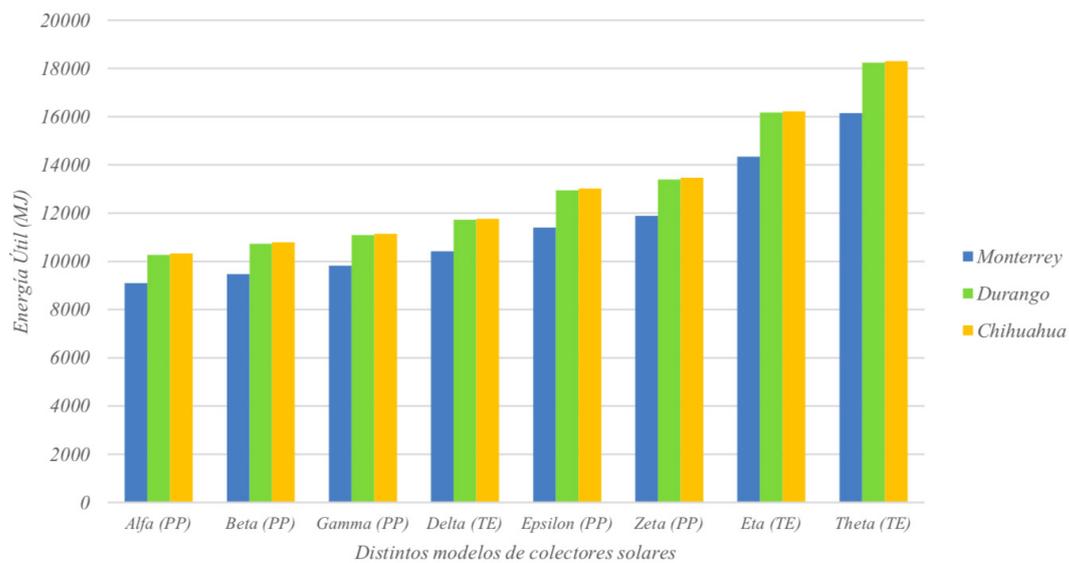


Fig. 1 Energía útil anual de 8 diferentes colectores solares variando la ubicación.

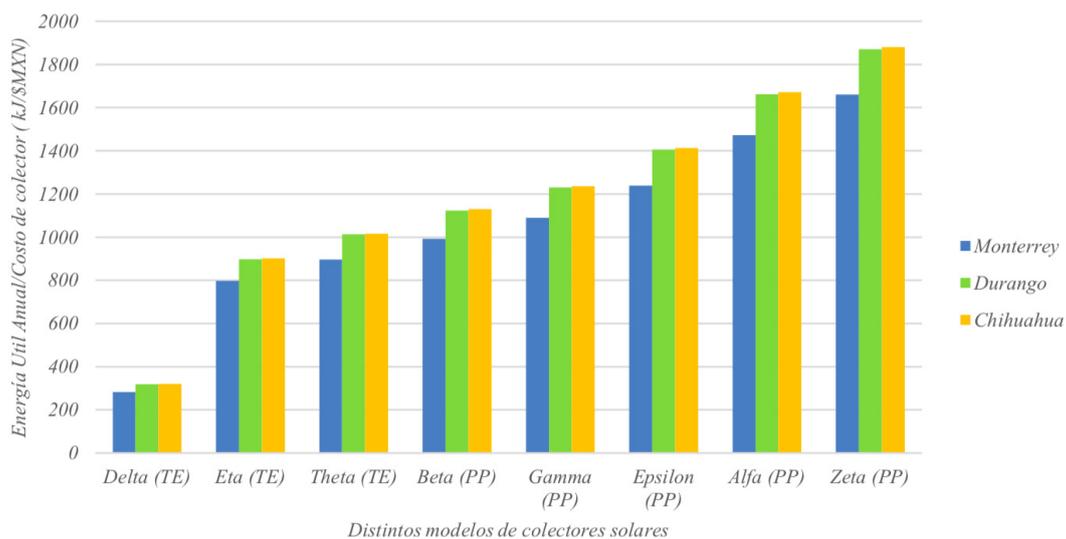


Fig. 2. Energía útil anual entre el costo de 8 diferentes colectores solares variando la ubicación.

El diseño mecánico dio como resultado un ensamble detallado con todos los componentes constructivos para el montaje de los dispositivos que conforman el sistema. Entre ellos se integraron los diseños industriales de las bases que soportan cada uno de los diferentes componentes móviles intercambiables. En la Fig. 3 se muestra el ensamble en SolidWorks de un posible arreglo del sistema de captación solar, almacenamiento térmico y energía auxiliar. El sistema de intercambio de calor Agua/Aire no se encuentra integrado en el sistema ya que este se encuentra en desarrollo mediante un proyecto adicional financiado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED).

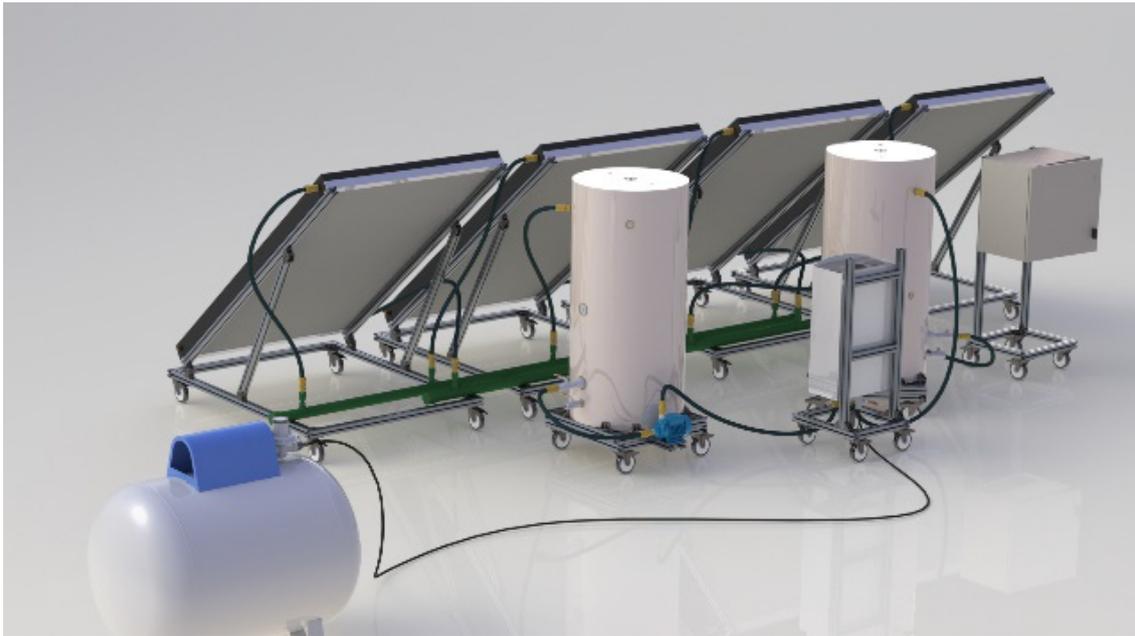


Fig. 3. Ensamble del sistema de captación solar, almacenamiento térmico y energía auxiliar

El diseño térmico tiene como finalidad el de caracterizar la operación del sistema, variando el número, tipo de colectores, almacenamiento térmico e intercambiadores de calor. Cuando se finalicen las actividades de diseño térmico se tendrá como resultado un mapa de operación térmica que proporcione las capacidades y alcances del sistema. En la Fig. 4 se muestran los resultados del análisis de una parte del sistema de captación en donde se consideran cuatro colectores solares (Zeta) en diferentes arreglos hidráulicos, obteniendo la energía útil y los gradientes de temperatura.

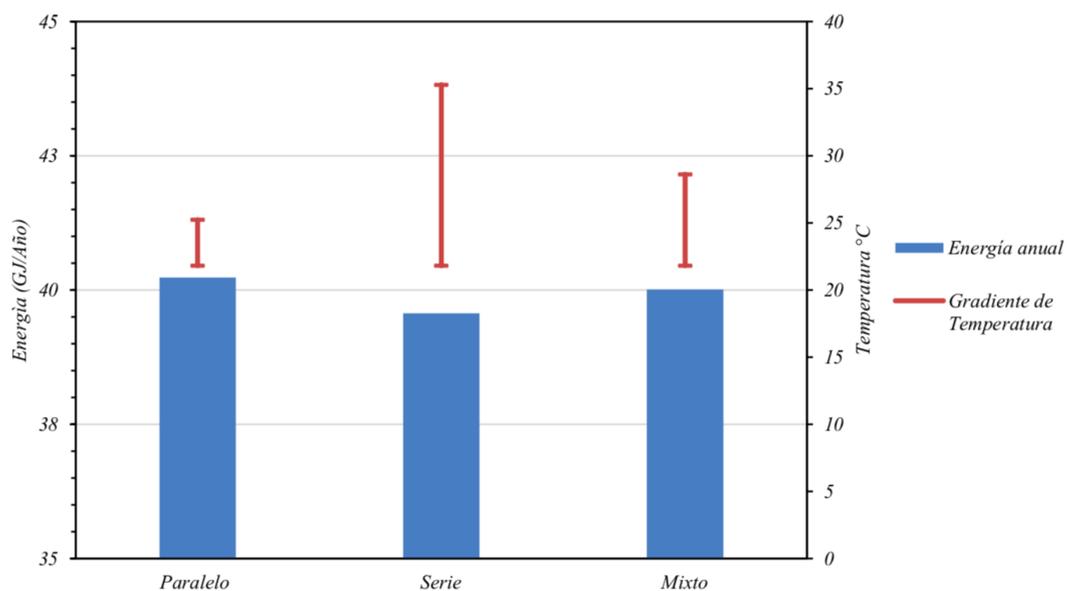


Fig. 4. Resultados utilizando el colector solar (Zeta) variando el tipo de conexión hidráulica

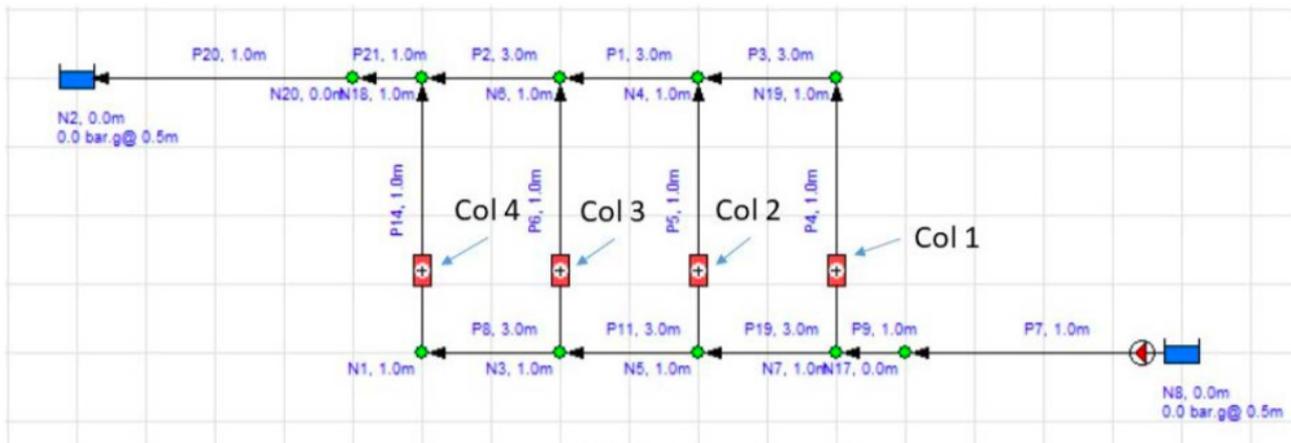


Fig. 5. Esquema hidráulico del arreglo en paralelo

Fig. 5. Esquema hidráulico del arreglo en paralelo.

En la Fig. 5, se muestra la hoja de trabajo en Pipe Flow Expert con el esquema hidráulico para el arreglo en paralelo. Uno de los resultados de esta simulación hidráulica se presenta en la Fig. 6, en donde es posible observar las diferentes curvas de operación de los arreglos hidráulicos serie, paralelo y mixto. Por ser un arreglo de muy pocos colectores, se tiene un requerimiento de carga y flujos muy pequeños por lo que la bomba para este propósito resulta también pequeña. La curva de operación de la bomba corresponde al modelo ecocirc 19-16 de la marca Bell & Gossett. Por ejemplo, el punto de operación del arreglo hidráulico serie, resulta a un flujo aproximado de 0.05 kg/s que representa una carga hidráulica de aproximadamente 0.05m. Sin embargo por el funcionamiento de la bomba, este flujo aumentara hasta 0.23 kg/s, aumentando a su vez la carga hidráulica de ese arreglo hasta aproximadamente 0.2 m.

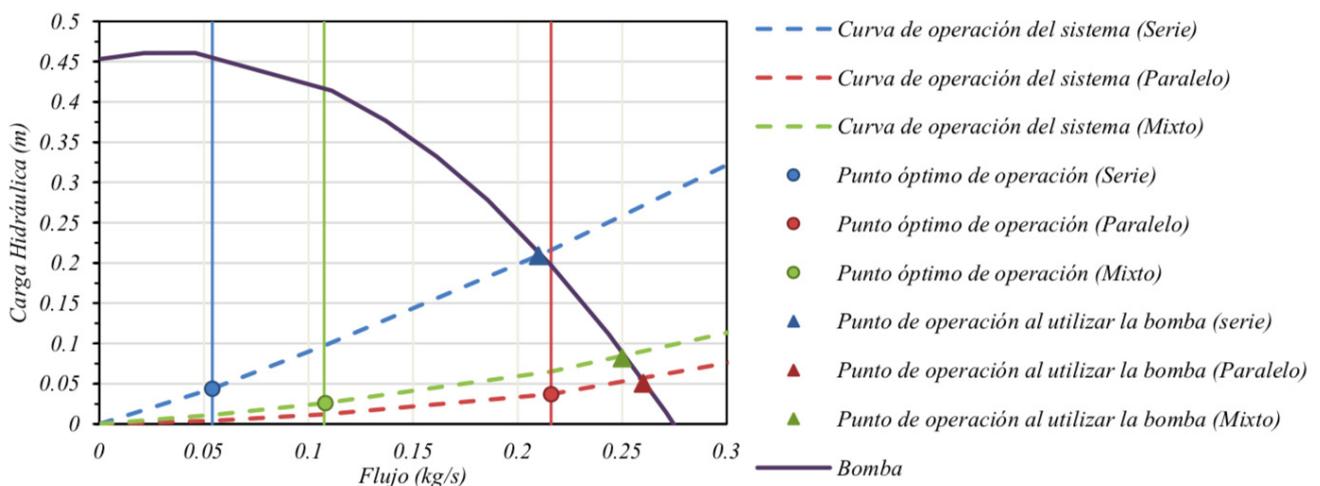


Fig. 6. Diagrama de operación de la bomba según el arreglo hidráulico

4.1 Integración del sistema

Actualmente el SCAAM es un proyecto sin apoyo económico directo, sin embargo la compra de la mayor parte de sus componentes se debe gracias al proyecto P13 de CeMIE-Sol y su integración ha sido posible mediante trabajo de residencias y una tesis de maestría que actualmente se encuentra en desarrollo. Se considera un avance del 60% ya que faltan componentes mecánicos, hidráulicos y electrónicos de control. No obstante este sistema ya está siendo utilizado para el desarrollo de diferentes proyectos, tales como, la construcción y caracterización de un prototipo híbrido térmico-fotovoltaico, y un túnel para la caracterización de radiadores automotrices. El SCAAM actualmente cuenta con 8 colectores solares de placa plana de dos diferentes marcas, dos termotanques de 300L cada uno, una caldera auxiliar tipo instantánea Bosch de 52 kW, una resistencia de 9kW, sistema de montaje deslizante y ajustable en el ángulo de inclinación de los colectores solares, conjunto de mangueras hidráulicas con terminales de acoplamiento rápido y un sistema de adquisición de datos que comprende: cinco dispositivos Hobo RX3000 WiFi con sensores de temperatura, flujo y transductores de presión. En la Fig. 6 es posible visualizar un ensamble parcial del SCAAM en donde se encuentra medio sistema de captación con las bases de montaje con piezas temporales, solo una de ellas se encuentra terminada con articulaciones y el sistema de intercambio de calor se encuentra en desarrollo.



Fig. 7. Ensamble parcial del SCAAM

5. Conclusiones

Se pretende que el SCAAM sea utilizado como una plataforma de pruebas para la caracterización de prototipos tanto de captación de energía solar como también para la evaluación del consumo energético de procesos que requieran calor. Es deseable que existan colaboraciones entre instituciones sobre proyectos sustentados con energía solar, en donde pueda haber un intercambio de capacidades e información. Como se menciona anteriormente, se considera un avance del 60% en el proyecto, sin embargo ya se cuenta con la capacidad de hacer múltiples pruebas. Se prevé completar la capacidad para la realización de todo tipo de pruebas termo-hidráulicas para el primer semestre del año entrante.

6. Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto: P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: FONDO SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA. Para el desarrollo de este proyecto.

7. Referencias

- [1] Asociación Alemana de la Industria Solar (BSW-Solar), Asociación Nacional de Energía (ANES), Cámara Mexicano-Alemana de Comercio e Industria (CAMEXA), and Ministerio Federal de Medio Ambiente Protección de la Naturaleza Obras Publicas y Seguridad Nuclear, “Calor Solar para la Industria-México,” *Sol. Payback*, p. 76, 2018.
- [2] P. Horta and F. Ise, “Process Heat Collectors: State of the Art and available medium temperature collectors,” *IEA SHC Task 49*, 2015.
- [3] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, “Solar industrial process heating: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. April, pp. 124–137, 2017.
- [4] J. P. Fine, S. B. Dworkin, and J. Friedman, “A methodology for predicting hybrid solar panel performance in different operating modes,” *Renew. Energy*, vol. 130, pp. 1198–1206, 2019.
- [5] J. a. Duffie, W. a. Beckman, and W. M. Worek, *Solar Engineering of Thermal Processes Solar Engineering*, 4th ed., vol. 116. 2013.

DISEÑO DE INVERNADEROS ASISTIDOS CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

PARA REGIONES CLIMÁTICAS DEL ESTADO DE DURANGO

**Mario H. González¹, Norma A. Rodríguez-Muñoz^{*2}, Jorge A. Escobedo-Bretado¹,
C. Omar Ríos-Orozco³, Ignacio R. Martín-Domínguez¹.**

*1- Departamento de Ingeniería Sustentable. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Calle CIMAV 110,
Ejido Arroyo Seco, 34147, Durango, Dgo., México.*

*2- Cátedras CONACYT. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Calle CIMAV 110,
Ejido Arroyo Seco, 34147, Durango, Dgo., México. norma.rodriguez@cimav.edu.mx*

*3 – Departamento de Metal-Mecánica, Durango. Instituto Nacional de México. Felipe Pescador 1803 Ote., Nueva Vizcaya,
34080, Durango, Dgo., México.*

Resumen: Al cultivar en condiciones controladas dentro de invernaderos, es posible aumentar la calidad y la cantidad de productos, disminuyéndose el uso de agua dentro del mismo. Sin embargo, la agricultura en invernaderos precisa de energía para mantener las condiciones ideales de producción. La demanda energética de un invernadero, es altamente dependiente de las condiciones ambientales y las necesidades de los cultivos que se encuentran al interior. Si incorpora un control climático eficiente, se logrará incrementar la productividad del invernadero con una reducción del consumo energético, logrando la viabilidad a largo plazo. La energía solar térmica se posiciona como una solución para disminuir el consumo energético de los invernaderos. Este estudio atiende la problemática del consumo de energía utilizado para climatizar invernaderos, al proponer un sistema de calefacción solar. Se evaluaron 2 ciudades: la ciudad de Durango, Durango y Torreón, Coahuila. La obtención de resultados se llevó a cabo mediante el uso de software de simulación dinámica TRNSYS 17, incorporando el clima típico de las ciudades seleccionadas, una combinación de materiales de cubierta y la selección de dos tecnologías de calentadores solares. Se obtuvo un ahorro de energía para calefacción de hasta 15.91% anual en Durango, y de hasta 9.08% en Torreón, debido a la implementación de energía solar, pasando del 40% de fracción solar en ambos casos.

Palabras clave: invernadero, simulación dinámica, TRNSYS, Durango, Torreón.

1. Introducción

Se estima que la población mundial aumentará de 7,349 mil millones de habitantes a 9,725 mil millones de habitantes entre 2015 y 2030 [1]. Por otro lado, de acuerdo al censo de 2010 se tiene que hay 112 millones de habitantes en México y el Consejo Nacional de Población (CONAPO) estima que para el 2030 la población será de 137 millones de habitantes [2]. Estas cifras, resultan de gran interés ya que mientras más habitantes se tengan, se demandará mayor cantidad de alimento y energía.

Estos argumentos nos han llevado a la necesidad de desarrollar alternativas para asegurar la seguridad alimentaria de la creciente población. Esta necesidad ha sido plasmada dentro de los Objetivos del desarrollo sostenible desarrollados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el objetivo 2: Cero hambre [3]. En este objetivo se menciona explícitamente la necesidad de “poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”.

Tradicionalmente, la agricultura se practica a cielo abierto, por lo que los cultivos se encuentran expuestos a las condiciones ambientales y riesgos de la zona; pudiendo ser: heladas, granizo, sequías, plagas, entre otros. Es por esto, que la agricultura protegida se considera como una excelente alternativa para reducir dichos riesgos. Al llevarse a cabo los cultivos bajo cubiertas de plástico o vidrio, es posible incrementar la calidad y cantidad de los productos.

Dentro de las distintas formas de llevar a cabo la agricultura protegida, el invernadero es la que reporta mayor rendimiento por superficie, llegando a ser hasta de 500 ton/ha para el caso del tomate [4]. De acuerdo al Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), México cuenta con 40,862 ha de superficie de agricultura protegida, con 60% de las instalaciones utilizadas para el cultivo de hortalizas. Del total de superficie, el 22.2% se encuentra en Sinaloa. La malla-sombra es el tipo de agricultura protegida más empleada en México. El tomate es el principal cultivo, destinando 4,067 ha en todas sus variedades, de esta superficie solo 731 ha son bajo invernadero, en su mayoría destinadas al cultivo de tomate bola [5].

Sin embargo, existen desventajas conocidas por la utilización de invernaderos, como lo es el alto consumo energético para mantener las condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. Llegando incluso a ser éste el mayor costo dentro de la vida útil de un invernadero. Donde la demanda de energía de un invernadero, dependerá de las condiciones climáticas exteriores y los requerimientos específicos de los cultivos de interés. Es por esto que es necesario introducir el control climático, con el fin de mantener las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo, y con esto conseguir las metas de producción del invernadero [6].

Mediante la implementación de sistemas de calefacción y refrigeración es posible controlar las condiciones requeridas por el cultivo, al interior del invernadero. Es por esto que si se logra un consumo energético reducido por los sistemas de climatización, la viabilidad de la agricultura protegida aumenta. En los últimos años, se ha visualizado a la energía solar como una de las soluciones para lograr ésta disminución del consumo energético, esto con el aprovechamiento de las tecnologías solar fotovoltaica y solar térmica actualmente disponibles en el mercado nacional.

En el estudio presentado en este documento, se pretende atender la problemática de consumo energético para climatizar invernaderos. Se propone implementar un sistema de calefacción solar asistida, mediante la simulación dinámica anual, evaluándolo en 2 regiones climáticas de interés en el estado de Durango y La Laguna.

2. Metodología

Se realizó el estudio paramétrico mediante simulación dinámica con el software TRNSYS 17. Este software permite simular sistemas térmicos y edificaciones, de una manera modular, con la posibilidad de incluir información climática del lugar de estudio, mediante el uso del Año Típico Meteorológico (TMY por sus siglas en inglés).

Los sitios de estudio elegidos fueron la ciudad de Durango, Durango (24.02°N, 104.67°O) y Torreón, Coahuila (25.57°N, 103.42°O). La segunda ciudad se seleccionó por dos motivos: su cercanía a la ciudad de Gómez Palacio, Durango, las cuales son las principales ciudades de la llamada zona lagunera; y el otro motivo fue por la disponibilidad de información climática. Dicha fuente es el software Meteonorm v7.1, el cual es una base de datos climática que incluye 7700 estaciones meteorológicas (disponible en www.meteonorm.com). El software obtiene el TMY a partir de interpolación de información de las fuentes disponibles (estaciones meteorológicas e información satelital). En el caso de la ciudad de Gómez Palacio, una de las fuentes de información es la estación del aeropuerto de Torreón, por lo que se optó por utilizar la ciudad ya interpolada de Torreón, la cual se encuentra más cerca al mencionado aeropuerto.

En la figura 1, se muestra la geometría del invernadero propuesto, el cual tiene dimensiones de 50 m de ancho y 100 m de largo (0.5 ha). Detalles sobre el diseño del invernadero evaluado se tomaron de un estudio previamente realizado por los autores [7]. El invernadero corresponde al tipo multi-túnel de 6 módulos, cada uno de 8m de ancho y la altura total es de 3.5 m. La capacitancia térmica se calculó con un rendimiento de 40 kg/m² de tomate, siendo el valor de 1320911 kJ/K, siguiendo la metodología descrita por Delgado-Rodríguez [8].

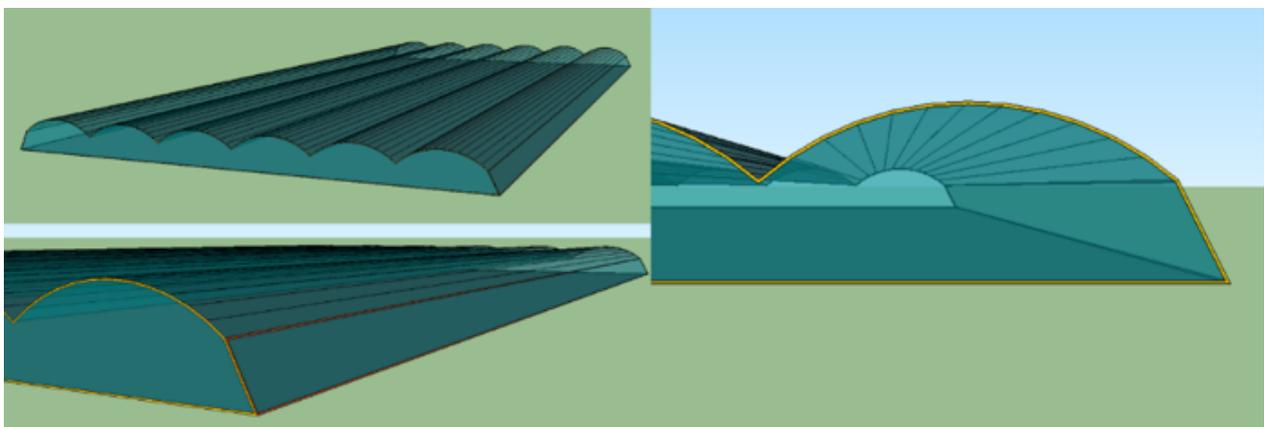


Figura 1. Diseño del invernadero realizado con Google Sketchup 8.

En este estudio, el invernadero es tratado como una edificación, en la cual sus muros se componen principalmente de cubiertas plásticas. Las cubiertas plásticas evaluadas fueron de polietileno de baja densidad (PEBD) y policarbonato (PC), en cubierta sencilla (-s) y doble (-d). En la tabla 1 se muestran las propiedades de cada material de cubierta.

Propiedades del material	Unidades	PC	PEBD
Conductividad térmica, k	W/m·K	0.19	0.45
Espesor	mm	4	0.18
Densidad, ρ	kg/m ³	0.18	0.91
Transmisividad solar, τ_{sol}	-	0.78	0.88
Reflectividad solar, ρ_{sol}	-	0.14	0.09
Transmisividad visible, τ_{vis}	-	0.75	0.89
Reflectividad visible, ρ_{vis}	-	0.15	0.1
Transmisividad IR, τ_{ir}	-	0.02	0.53
Reflectividad IR, ρ_{ir}	-	0.09	0.07
Coefficiente de pérdidas de calor, U	W/m ² ·°C	5.38	6.831
Coefficiente de ganancia solar, SHGC	-	0.802	0.884

Tabla 1. Propiedades de las cubiertas plásticas del invernadero [6]

Tabla 1. Propiedades de las cubiertas plásticas del invernadero [6]

Sin embargo, estas cubiertas no se encuentran en la base de datos de ventanas de TRNSYS, por lo que se utilizó el software WINDOW 7.4 para darlos de alta en la base de datos. En el caso de las cubiertas dobles, entre ambas se encuentra una capa de aire con un espesor de 1", las propiedades del aire son las que tiene por defecto cargadas el software WINDOW 7.4. Se dieron de alta las propiedades a través de WINDOW 7.4 para dar de alta los materiales PEBD- polietileno de baja densidad y PC- policarbonato debido a que no se encontraron plásticos con las propiedades térmicas y ópticas que representen a los materiales utilizados.

La temperatura es un factor determinante para el desarrollo óptimo del cultivo, y se reporta de manera distinta, ya sea en un rango óptimo dependiendo la etapa de crecimiento [9,10], o sin distinguir la etapa [6]. En este estudio, el objetivo es mantener el rango de temperatura interna entre 15 y 30 °C. Una temperatura menor a este rango puede causar un crecimiento lento del cultivo, mientras que estar por encima del rango puede provocar la muerte del mismo.

Con base en el rango propuesto de temperatura, se establecieron los límites de funcionamiento del sistema de climatización del invernadero, utilizando un termostato que monitorea la temperatura interna. En la figura 2 se muestra el esquema de simulación en TRNSYS, mientras que en la figura 3 se muestra el circuito de colectores solares. En este circuito se observan los dos tipos de colectores simulados, de placa plana y tubos evacuados. Dentro del mismo hay una variable que indica cuál de los dos utilizar durante la simulación.

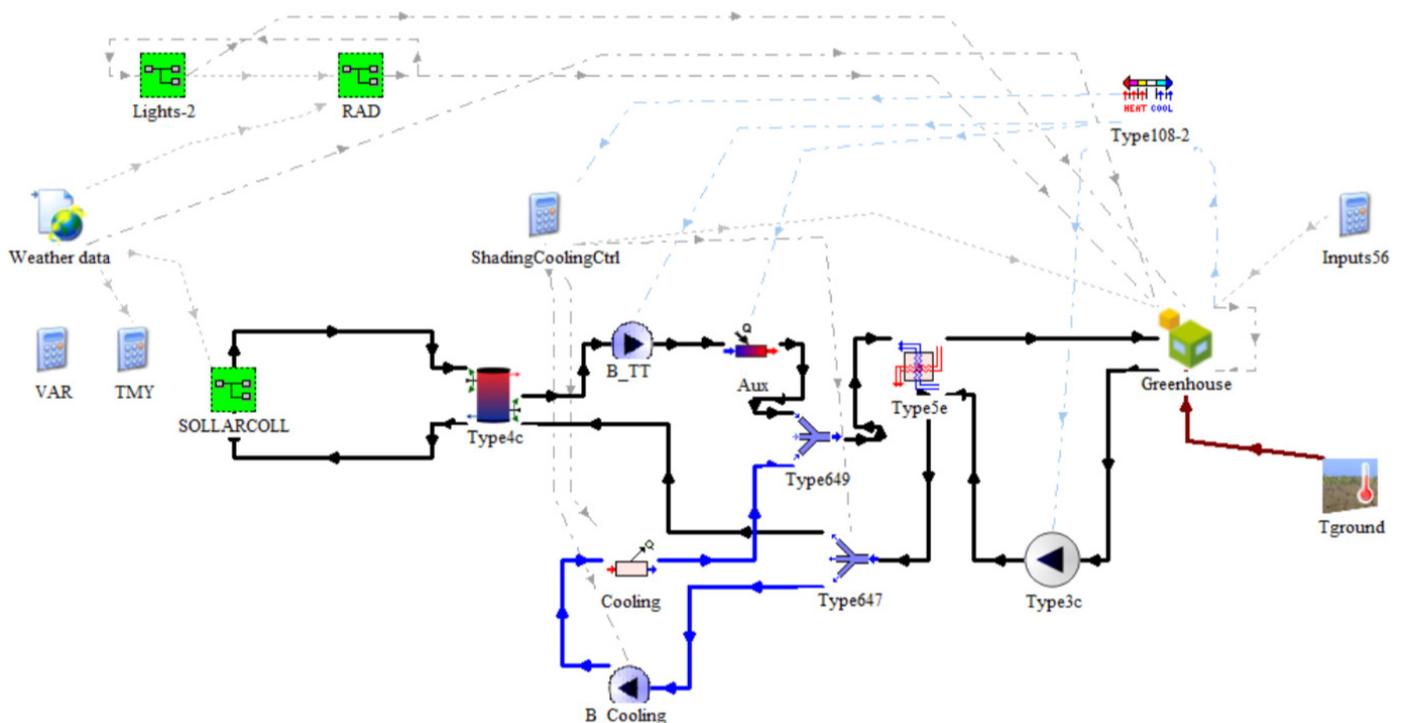


Figura 2. Esquema del sistema modelado en TRNSYS.

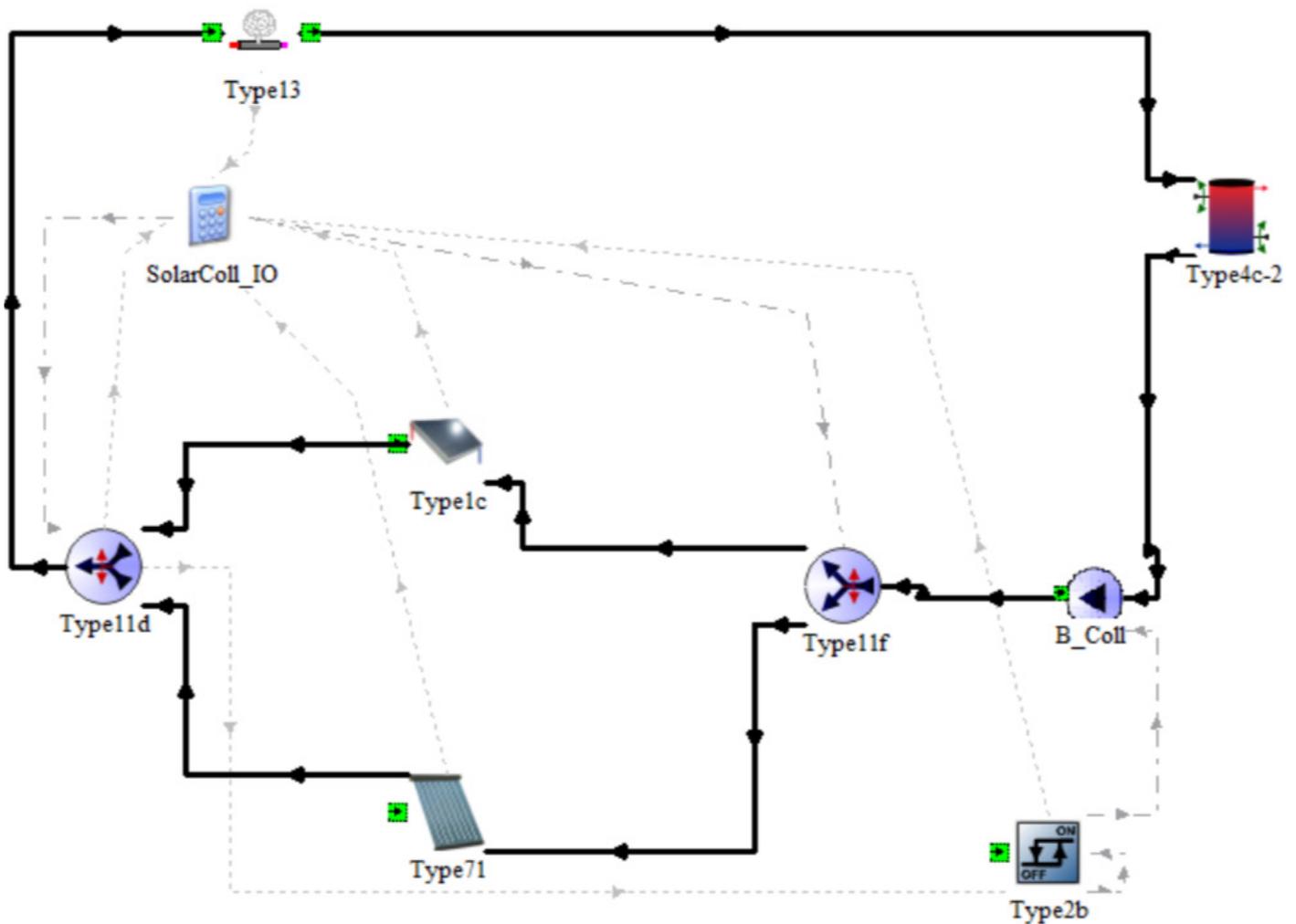


Figura 3. Esquema del sistema de colección solar.

En la tabla 2 se describen los principales sistemas que se implementaron en la simulación por medio de componentes (types) de TRNSYS. En dicha tabla se detalla el funcionamiento de los principales sistemas e información para llevar a cabo la simulación dinámica.

Mientras que en las figuras 4 y 5, se presentan las características climáticas de las ciudades de interés: Durango, Durango y Torreón, Coahuila. En la figura 4, se muestran las temperaturas promedio, mínimas y máximas mensuales, así como la radiación global horizontal (kWh/m_2). Mientras que en la figura 5 se presenta la precipitación acumulada mensual (mm) y la humedad relativa promedio.

Tabla 2. Componentes (Types) de TRNSYS utilizados.

Componente	Descripción	Icono
Clima	Componente que lee el archivo TMY y, mediante las respectivas conexiones, envía los datos climáticos a cada componente que los requiera como información de entrada.	 Clima
Termostato	Monitorea la temperatura al interior del invernadero, activa la calefacción cuando la temperatura está por debajo de 16°C; y el enfriamiento cuando la temperatura está por encima de 29°C. Cuenta con una “banda muerta” de 2°C para evitar que el actuador se active y desactive constantemente. Adicionalmente, la señal de enfriamiento/calentamiento de este dispositivo activa válvulas de control para evitar que se mezcle el fluido de ambos sistemas de climatización.	 Type108-2
Tanque de almacenamiento estratificado	El termostato cuenta con dos entradas y dos salidas. Recibe agua caliente en su parte superior del circuito de colección solar, y retorna agua de su parte inferior al mismo circuito. Por el otro lado, sale agua caliente de la parte superior, al sistema de calefacción, y regresa el agua a su parte inferior proveniente del mismo sistema. Un controlador diferencial monitorea la temperatura superior e inferior del tanque para activar la bomba del circuito solar cuando existe una diferencia de 10 °C, y es desactivada cuando la diferencia es menor a 1°C. El volumen del tanque es de 60 L por m ² de colector solar. Sin colectores solares, el volumen es de 1 m ³ .	 Termo - Tanque
Bombas de velocidad constante	Su función es alimentar agua a los diferentes dispositivos. En el caso de los colectores solares, el flujo másico de agua se estableció como lo indica su ficha de certificación.	 Bomba - Auxiliar
Colector solar de placa plana	Marca: Modulo Solar, Modelo: Maxol MS 2.5, Área:2.506 m ² , con inclinación igual a la latitud de la ciudad. La curva de eficiencia térmica está dada por la siguiente ecuación (Fuente: Ficha de certificación SRCC): $\eta = 0.697 - 3.14480 \frac{P}{G} - 0.01650 \frac{P^2}{G}$ Donde P es la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido de trabajo y la temperatura ambiente (Ti - Ta), y G es la radiación solar global en W/m ²	 Colector Solar
Colector solar de tubos evacuados	Marca: Apricus, Modelo: ETC-30, Área: 4.397 m ² , con inclinación igual a la latitud de la ciudad. La curva de eficiencia térmica está dada por la siguiente ecuación (Fuente: Ficha de certificación SRCC): $\eta = 0.437 - 0.9585 \frac{P}{G} - 0.0073 \frac{P^2}{G}$	 Type71
Calentamiento auxiliar	Es activado cuando la temperatura del agua proveniente del termostato se encuentra por debajo de 60°C. Este type calcula la energía requerida para mantener el fluido a esa temperatura mínima.	 Caldera Auxiliar
Enfriamiento auxiliar	El funcionamiento es similar al type de calentamiento, solo que este type calcula la energía que se requiere extraer para mantener el fluido a 2°C. Es activado por el termostato.	 Cooling
Intercambiador de calor	Intercambiador de calor agua-aire Lytron 6340. UA de 400 W/°C con el flujo de aire y agua especificados por el fabricante.	 Intercambiador de Calor
Ventilador	Se encarga de hacer fluir aire por el intercambiador de calor, tomando el aire del interior del invernadero.	 Ventilador
Invernadero	Este componente lee los archivos de descripción de la edificación (invernadero) creados por TRNBuild. Genera la conexión entre ambos módulos de TRNSYS (Simulation Studio – TRNBuild).	 Invernadero
Temperatura del suelo	Calcula el cambio de temperatura del suelo a lo largo del año típico, a partir de las características definidas para el suelo. La temperatura es enviada al invernadero como condición de frontera para los cálculos relacionados con la edificación.	 Tground

Tabla 2. Componentes (Types) de TRNSYS utilizados.

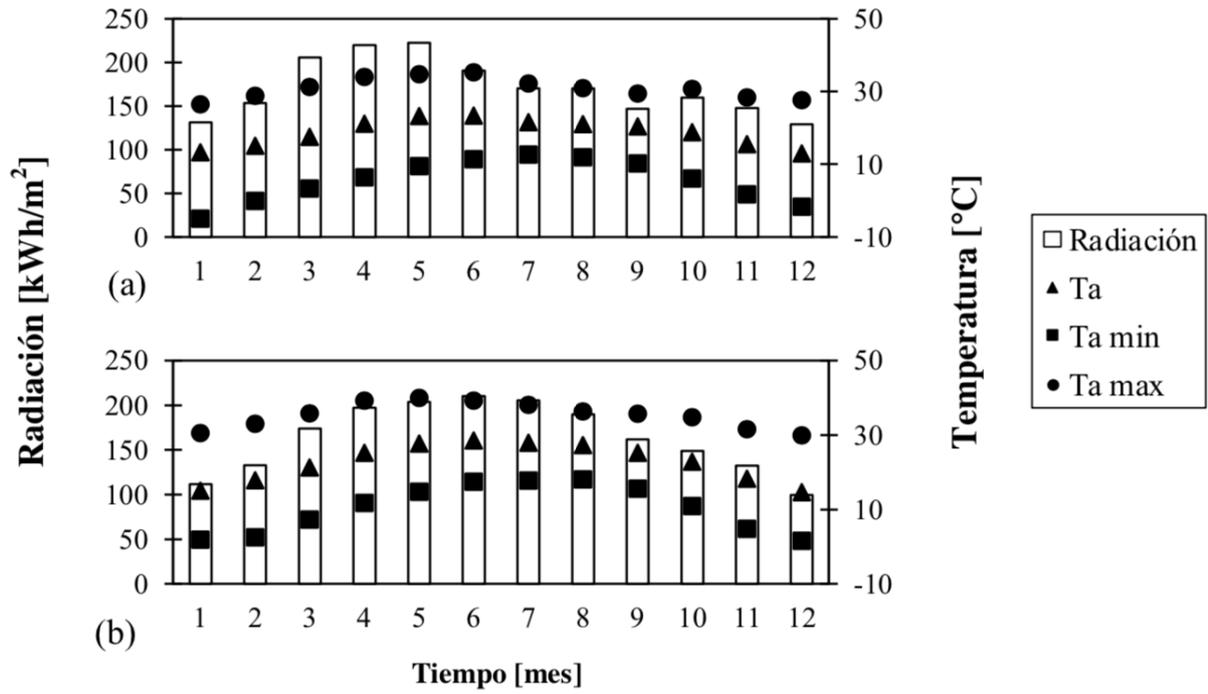


Figura 4. Radiación global horizontal, temperatura ambiente promedio, mínima y máxima mensual, para (a) Durango, (b) Torreón. Elaboración propia con datos de Meteonorm v 7.1.

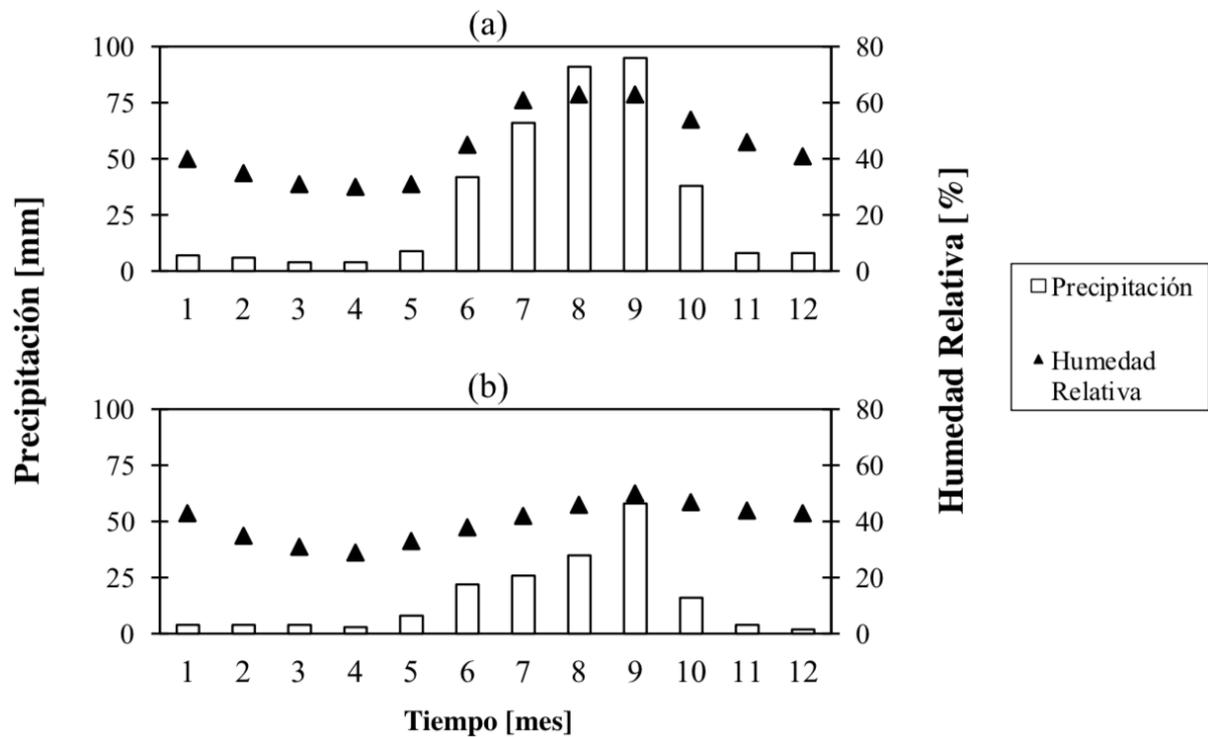


Figura 5. Precipitación y humedad relativa promedio mensual, para (a) Durango y (b) Torreón. Elaboración propia con datos de Meteonorm v 7.1.

3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de temperatura interior para los periodos de menor y mayor temperatura del año para los casos cuando no se considera un invernadero climatizado. De igual forma se obtuvo el consumo de energía de los invernaderos climatizados, debido a la utilización de sistemas tanto de calefacción como refrigeración, así como el porcentaje de utilización de los sistemas de calefacción contra los requeridos para disminuir las temperaturas al interior del invernadero propuesto.

En la figura 6, se observa la temperatura alcanzada en interior del invernadero, para las cubiertas de PC y PEBD, sencillas y dobles para el periodo de menor temperatura (a) y mayor temperatura (b). En las figuras 6a, en la imagen de la izquierda (Durango), se observa que solamente con las cubiertas dobles se puede superar el límite inferior para el desarrollo de la planta (15°C). Mientras que en Torreón la situación es diferente, ya que con todas las cubiertas se rebasa el límite inferior. Sin embargo, en ambas ciudades, la temperatura al interior es menor al límite inferior durante varias horas en el período mencionado. En las figuras 6b, se observa que, en los invernaderos en ambas ciudades, y construidos con todas las cubiertas, se sobrepasaría la temperatura máxima adecuada para el desarrollo del cultivo.

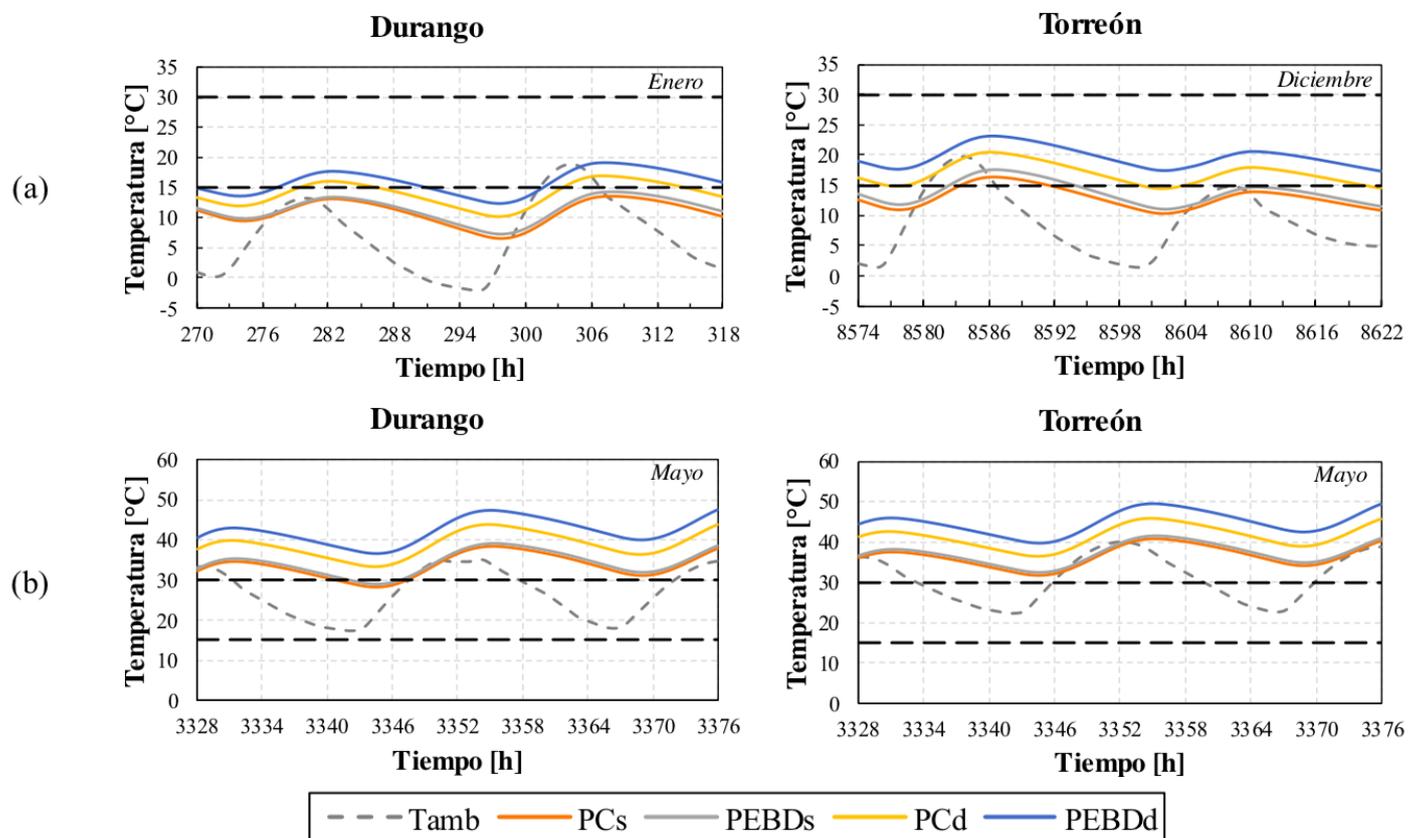


Figura 6. Temperatura ambiente e interior en las ciudades de Durango y Torreón. (a) Período de menor temperatura ambiente y (b) Período de mayor temperatura ambiente.

En la figura 7, se muestra el consumo energético anual calculado que se requerirá debido al uso de sistemas de calefacción y enfriamiento en el invernadero de estudio. Con estos resultados se podrá evaluar posteriormente el ahorro energético obtenido debido a la incorporación del sistema de colectores solares (placa plana y tubos evacuados). Con respecto a los consumos energéticos, se observa en la figura 7, que el invernadero que requeriría mayor energía para calentarse, son los que tienen cubiertas sencillas. En la ciudad de Durango, se requeriría 370 y 281 GJ, con las cubiertas PCs y PEBDs. Al comparar los consumos de los invernaderos con cubiertas sencillas y dobles, los consumos para los invernaderos de cubierta doble serían menores hasta en un 83 % (PC) y 96% (PEBD). De igual manera, cuando se comparan los consumos requeridos para Torreón, Coahuila, los consumos por calefacción son menores cuando se tienen las cubiertas dobles, siendo la diferencia 78% (PC) y 96% (PEBD), entre cubierta sencilla y doble.

Este comportamiento se atribuye directamente al efecto aislante que proporciona la capa de aire contenida dentro de las cubiertas plásticas. Además las pérdidas de calor son menores y por lo tanto se requiere una menor cantidad de energía para mantener el interior del invernadero arriba de los 15°C. Sin embargo, el tener una cubierta doble afecta aumentándose el consumo de energía por refrigeración, ya que se observa que el requerimiento de energía para enfriamiento es mayor cuando se tiene la cubierta doble.

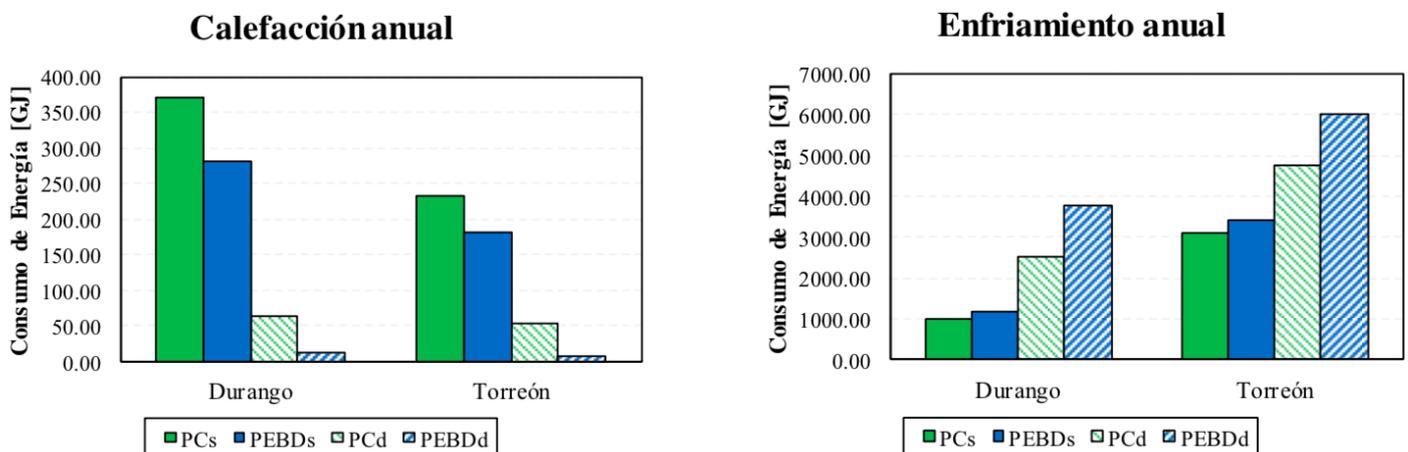


Figura 7. Consumo de energía anual (GJ). a) Calefacción b) Enfriamiento.

En la figura 8, se muestra la relación de consumo energético por calefacción y refrigeración que se tiene en ambas ciudades y para las cuatro configuraciones de cubiertas plásticas. Se observa que en Durango se requerirá mayor proporción de energía para calentar los invernaderos de cubiertas sencillas. Adicionalmente se observa que para las cubiertas PEBD dobles, se requerirá una mínima proporción de energía por calefacción, siendo que para Torreón, se requerirá únicamente refrigerar el invernadero.

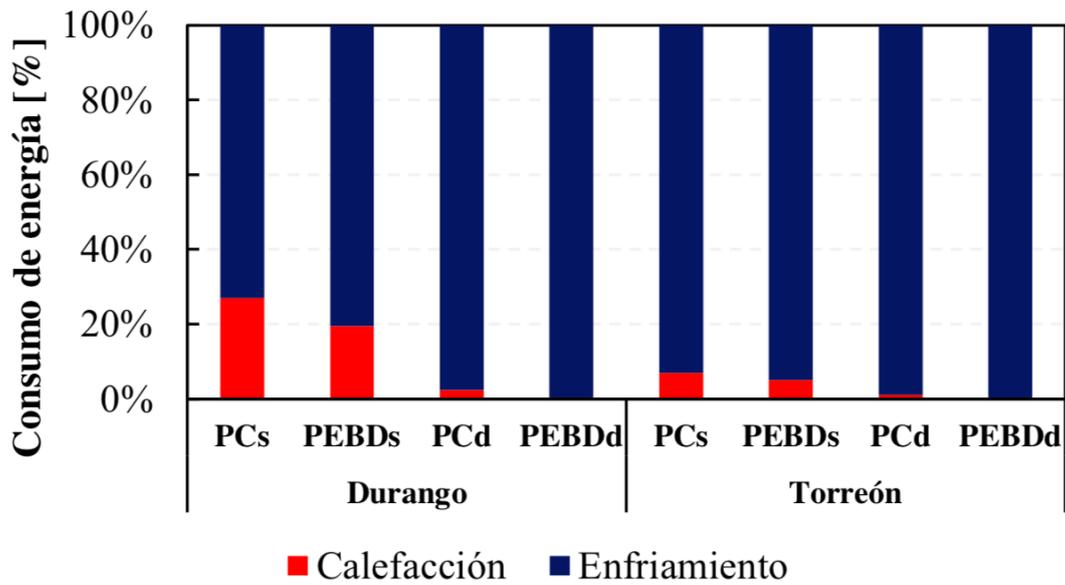


Figura 8. Relación de consumo de energía anual destinada para calefacción y enfriamiento (%).

En la Tabla 3 se muestra la irradiancia mensual acumulada en MJ/m^2 , horizontal e incidente sobre el colector solar, para ambas ciudades. Se puede observar que el valor máximo de irradiancia incidente en el colector, se presenta en marzo y abril, para Durango y Torreón, respectivamente. Mientras que el valor mínimo se da en septiembre y diciembre, para Durango y Torreón, respectivamente.

Tabla 3. Irradiancia horizontal e incidente mensual en los sitios de estudio (Fuente: TMY de Meteonorm v7.1)

		Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Irradiancia Horizontal (MJ/m^2)	Durango	471.9	552.2	739.9	790.5	800.2	685.7	612.6	612.4	528.3	573.8	530.9	464.5
	Torreón	401.4	479.0	625.8	710.0	733.6	756.2	739.0	682.8	583.1	535.7	476.9	358.6
Irradiancia Incidente (MJ/m^2)	Durango	627.3	681.6	828.8	794.3	744.2	613.7	562.6	592.2	549.4	664.2	697.3	639.2
	Torreón	534.0	596.3	701.2	715.7	683.9	675.5	673.8	662.2	613.9	638.9	633.1	485.0

Tabla 3. Irradiancia horizontal e incidente mensual en los sitios de estudio (Fuente: TMY de Meteonorm v7.1)

En la figura 9, se muestra el calor útil anual por unidad de área, para cada tipo colector. La barra indica el valor promedio encontrado en todas las simulaciones, ya que no se observó una gran variación. El valor promedio en Durango es más alto que en Torreón, siendo de 12.3% y 8.3%, mayor para el colector de placa plana y tubos evacuados, respectivamente.

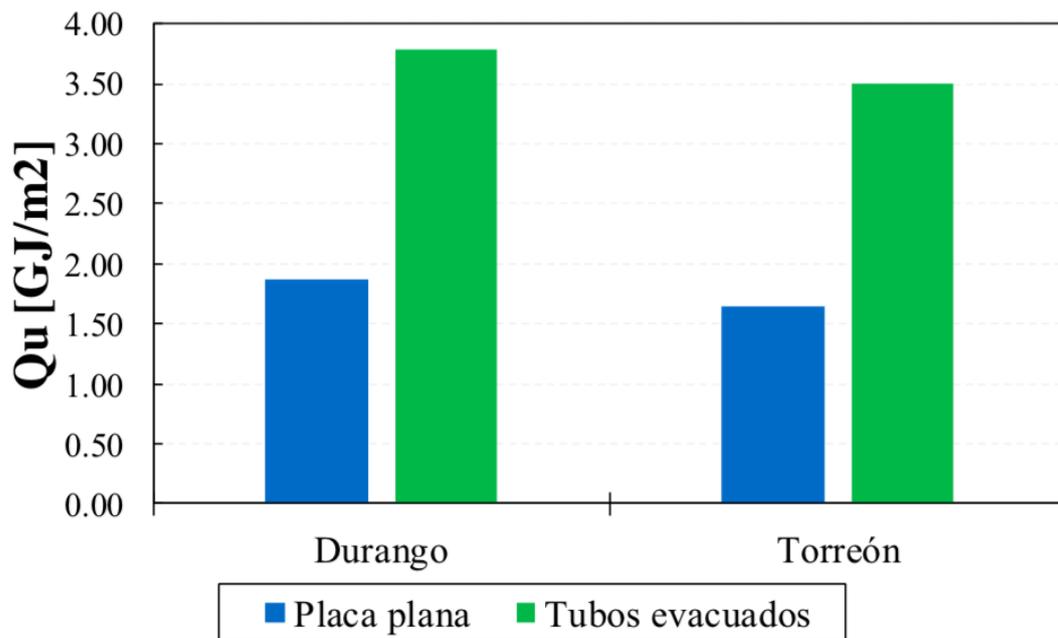


Figura 9. Calor útil por unidad de área de colector.

En la figura 10 se muestra el consumo anual de energía para calefacción y la fracción solar (FS), al variar la cantidad de colectores solares de placa plana. La fracción solar representa la proporción de energía suministrada por el sistema de colección solar en relación al total de energía demandada por el sistema de calefacción, y se calcula mediante la ecuación (1) descrita por Duffie & Beckman [11]:

$$FS = \frac{Q_{total} - Q_{aux}}{Q_{total}} \quad (1)$$

Donde FS es la fracción solar, Q_{aux} es la energía suministrada por el calentador auxiliar, y Q_{total} es el total de energía demandada (solar + auxiliar).

Como se observa en la figura 10, las cubiertas dobles tienen un consumo muy bajo en comparación al consumo con las cubiertas sencillas. Por esto es que no se observa una disminución del consumo de energía, al aumentar el número de colectores solares. La FS del 40% se alcanza con 10 colectores de placa plana, con ambas cubiertas dobles, en Durango. Mientras que, con las cubiertas sencillas, en Durango también, se requieren al menos 40 y 50 colectores de placa plana, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. Con esa cantidad de colectores de placa plana, se tiene un ahorro de consumo de energía de 14.28% y 13.92%, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. En el caso de las cubiertas dobles, con 10 colectores de placa plana, los ahorros de energía son de 2.56% y 2.60%, con la cubierta de PEBDd y PCd, respectivamente.

Para el caso de Torreón, son necesarios al menos 30 y 40 colectores de placa plana, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. Con lo que se logra un ahorro de consumo de energía de 6.50% y 9.08%, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. En el caso de las cubiertas dobles, con 10 colectores de placa plana, los ahorros de energía son de 5.52% y 2.78%, con la cubierta de PEBDd y PCd, respectivamente.

La figura 11 muestra información similar a la 10, solo que para colectores de tubos evacuados. Y al igual que la figura anterior, se observa un comportamiento similar con las cubiertas dobles. Para la ciudad de Durango con 10 colectores de tubos evacuados se pasa del 40% de FS, y los ahorros de energía son de 5.57% y 5.14%, con la cubierta de PEBDd y PCd, respectivamente. Continuando con Durango, se requieren de al menos 20 y 30 colectores de tubos evacuados, para pasar del 40% de FS, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. Logrando un ahorro de energía de 13.06% y 15.91%, con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente.

Para el caso de Torreón, son necesario al menos 20 colectores de tubos evacuados, con las cubiertas sencillas. Con lo que se logra un ahorro de energía del 8.09% y 8.51% con la cubierta de PEBDs y PCs, respectivamente. En el caso de las cubiertas dobles, con 10 colectores de placa plana, los ahorros de energía son de 11.96% y 5.60%, con la cubierta de PEBDd y PCd, respectivamente.

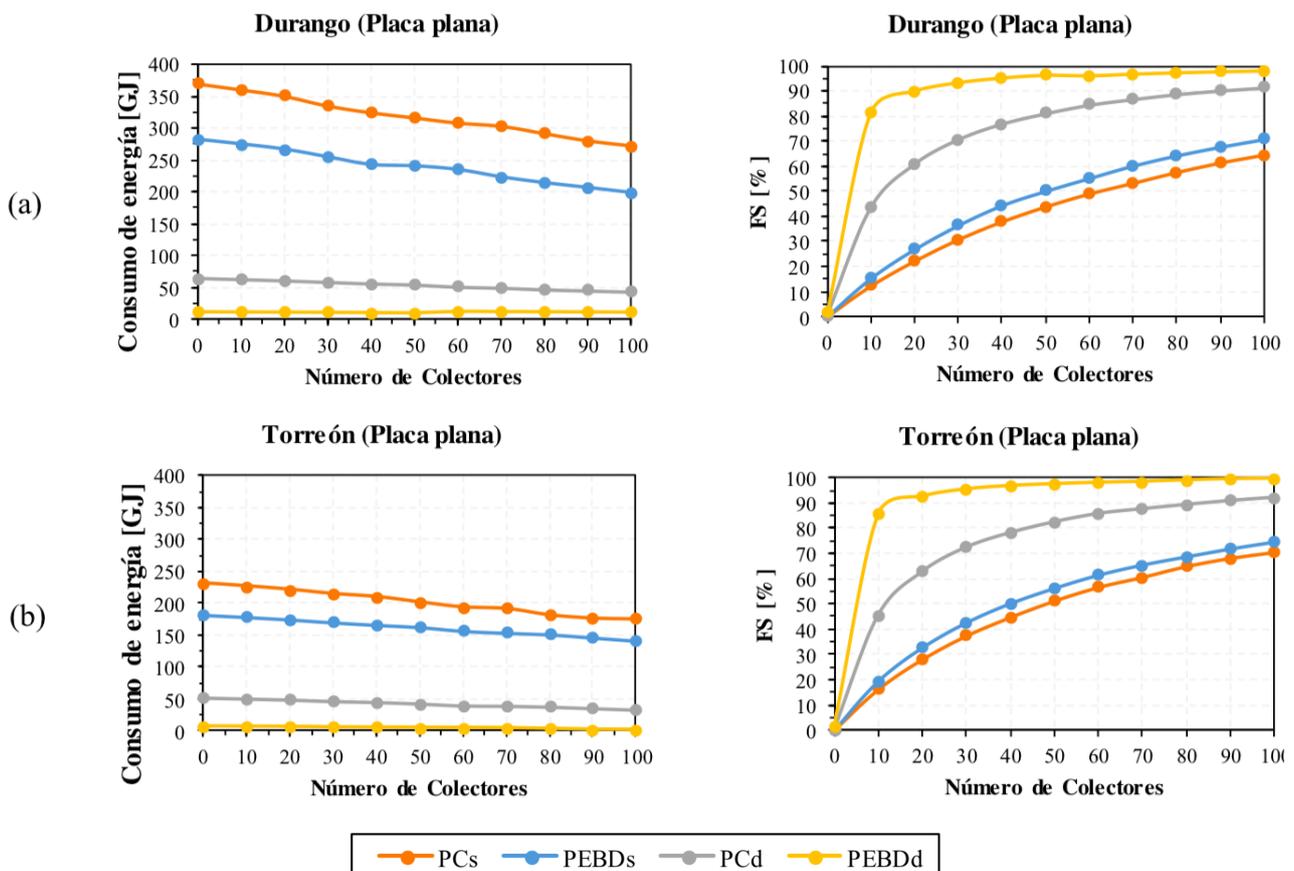


Figura 10. Consumo de calefacción anual (izquierda) y fracción solar (derecha) con colectores de placa plana, para Durango (arriba) y Torreón (abajo).

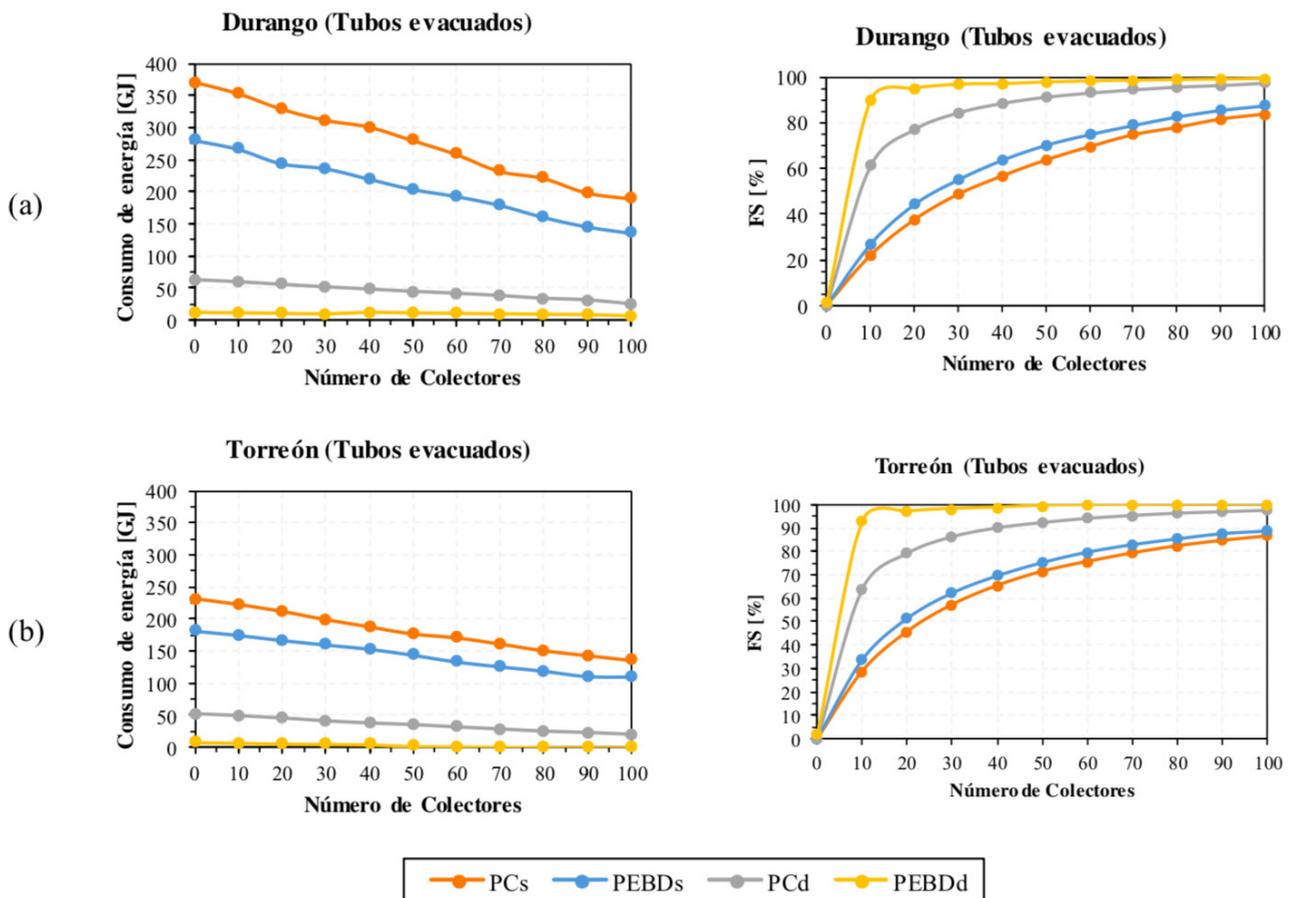


Figura 11. Consumo de calefacción anual (izquierda) y fracción solar (derecha) con colectores de tubos evacuados, para Durango (arriba) y Torreón (abajo).

4. Conclusiones

Se realizó el análisis paramétrico de un invernadero de media hectárea, en las ciudades de Durango y Torreón, mediante simulación dinámica con el software TRNSYS 17. De acuerdo a los resultados obtenidos, con las cubiertas dobles, al tener un efecto aislante térmico mayor, se tiene menor consumo de energía para calefacción.

El mismo efecto aislante de las cubiertas dobles provoca un consumo mayor por enfriamiento, en comparación a lo reportado con las cubiertas sencillas. Se podría implementar un sistema de enfriamiento aprovechando la energía solar para disminuir el consumo por enfriamiento del invernadero, sin embargo este análisis quedó fuera de los objetivos de este estudio. Debido a la relevancia de mejorar el comportamiento durante la temporada cálida se considerará para estudios futuros. El uso de colectores solares, en el sistema de calefacción asistido, genera un ahorro en el consumo de energía anual para este fin. Logrando un mayor ahorro con cubierta de PC en comparación a la de PEBD, cuando se trata de cubierta sencilla.

Al establecer un mínimo de 40 % de fracción solar, con las cubiertas sencillas, el mayor ahorro de consumo por calefacción fue de 15.91% en Durango, con 30 colectores de tubos evacuados y la cubierta de PC. Esto representa un área de colección solar de 131.91 m², con un almacenamiento en el termotanque de 7.915 m³.

En el caso de las cubiertas dobles, a pesar del bajo consumo que muestran anualmente, la integración de los colectores solares si representa un ahorro de energía (hasta del 11.99% en el caso de Torreón con PEBDD). Logrando fracción solar superiores al 40% con solo 10 colectores solares de placa plana o tubos evacuados. Sin embargo, no se ve una disminución considerable al observar las cantidades de consumo de energía final.

En el caso de las cubiertas sencillas, los mayores ahorros de energía para calefacción, se logran en la ciudad de Durango, esto se atribuye a la mayor irradiancia solar en comparación a la ciudad de Torreón. Para trabajos a futuro, se realizará un análisis económico, que permita evaluar otros aspectos y no solo la fracción solar. Ya que este criterio resulta arbitrario en su elección del porcentaje mínimo que se quiera alcanzar.

5. Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca con número de apoyo 435796 y como asistente de investigación del proyecto PND-2015:1099 con el apoyo 27373. De igual forma al M.C. Mario Nájera Trejo por el apoyo brindado en la implementación de la simulación.

6. Referencias

- [1] UN DESA, *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables, 2015*. https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf.
- [2] CONAPO, *República Mexicana: Indicadores demográficos, 2010-2050, (2013)*. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos (accessed October 14, 2016).
- [3] United Nations General Assembly, *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, (2015)*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>.
- [4] H. Gaxiola Carrasco, *Importancia de Sinaloa y México en la agricultura protegida*, *Rev. Cienc. y Univ.* 29 (2010) 69.
- [5] SIAP, *Atlas Agroalimentario 2017, 2017*. http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/descargar/2017/Atlas-Agroalimentario-2017.
- [6] D.L. Valera Martínez, F.D. Molina, A.J. Álvarez, *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, España, 2008. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf.
- [7] M.H. González, N.A. Rodríguez-Muñoz, J.A. Escobedo-Bretado, I.R. Martín-Domínguez, *Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango*, *Rev. Innovación Sist.* 1 (2017) 43–55. http://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Innovacion_Sistemica/vol1num1/Revista_de_Innovacion_Sistemica_V1_N1_4.pdf.
- [8] J.E. Delgado-Rodríguez, *Diseño y selección de los sistemas de climatización para un invernadero agrícola utilizando tecnologías solares mediante simulación dinámica en TRNSYS*, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2015.
- [9] J.Z. Castellanos, *Manual De Producción Hortícola En Invernadero*, 2nd ed., Celaya, Guanajuato, México, 2004.
- [10] H.M. Leon Gallegos, *Guía Para el Cultivo De Tomate en Invernadero*, 2nd ed., SEP- Gobierno del Estado de Chihuahua, Mexico, 2006.
- [11] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, 2013.

