



DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2024.79.07.3>

How to Cite:

González-Villanueva, D., Juárez-Hernández, M.L., Martínez-cruz, M.A., Trejo-Martínez, A., & Chávez-Pichardo, M. (2024).
Destilador solar innovador para la producción sostenible de esencias cítricas. *Amazonia Investiga*, 13(79), 30-46.
<https://doi.org/10.34069/AI/2024.79.07.3>

Destilador solar innovador para la producción sostenible de esencias cítricas

Innovative solar distiller for sustainable production of citrus essences

Received: June 20, 2024

Accepted: July 29, 2024

Written by:

Daniel González-Villanueva¹

 <https://orcid.org/0009-0006-4311-3648>

Miriam Laura Juárez-Hernández²

 <https://orcid.org/0009-0001-6207-0480>

Miguel Ángel Martínez-cruz³

 <https://orcid.org/0000-0002-4431-9262>

Alfredo Trejo-Martínez⁴

 <https://orcid.org/0000-0001-6555-2285>

Mauricio Chávez-Pichardo⁵

 <https://orcid.org/0000-0002-3378-0440>

Resumen

Los destiladores tienen diversas aplicaciones, entre ellas la producción de esencias naturales. El alto coste y el impacto medioambiental de los métodos tradicionales de extracción hacen necesario el desarrollo de alternativas sostenibles. En este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un destilador solar combinado que utiliza energía solar concentrada como fuente primaria y energía fotovoltaica como fuente secundaria para la producción de esencias naturales de cítricos. El destilador incorpora un concentrador de disco parabólico y un sistema de estabilización de temperatura. Las pruebas experimentales demuestran que el destilador solar alcanza las temperaturas requeridas para la destilación en menos tiempo y aumenta la producción de esencias en comparación con los métodos convencionales. Estos resultados ponen de relieve el potencial de este enfoque sostenible para la producción de esencias naturales.

Palabras clave: Destilación, concentración solar, esencias naturales, destilación solar, energía fotovoltaica.

Abstract

Distillers have various applications, including the production of natural essences. The high cost and environmental impact of traditional extraction methods necessitate the development of sustainable alternatives. This paper presents the design and construction of a combined solar distiller that utilizes concentrated solar energy as the primary source and photovoltaic energy as a secondary source for the production of natural citrus essences. The distiller incorporates a parabolic dish concentrator and a temperature stabilization system. Experimental tests demonstrate that the solar distiller achieves the required temperatures for distillation in less time and increases essence production compared to conventional methods. These results highlight the potential of this sustainable approach for producing natural essences.

Keywords: Distillation, solar concentration, natural essences, solar distillation, photovoltaic energy.

¹ TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México. Estudiante de Doctorado en Ingeniería en Sistemas en el IPN ESIME-ZAC, México.  WoS Researcher ID: LDB-3455-2024

² TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Estudiante de Doctorado en Ingeniería en Sistemas en el IPN ESIME-ZAC, México.  WoS Researcher ID: KVH-6832-2024

³ TecNM -IPN ESIME ZAC, México.  WoS Researcher ID: ADX-7792-2022

⁴ TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México.  WoS Researcher ID: E-5531-2012

⁵ TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México.  WoS Researcher ID: KFS-9130-2024



Introducción

Las esencias naturales son líquidos volátiles destilados y obtenidos de semillas, cáscaras, pétalos, hojas, tallo, troncos y raíces de plantas, frutas, vegetales y flores, una de las características principales es que siempre contienen una molécula definida. Algunas de las más utilizadas son extraídas de los cítricos (naranja, limón, mandarina, toronja lima y pomelo (Ambuludí, 2014).

La destilación es una técnica utilizada en la separación de sustancias volátiles miscibles entre sí con puntos de ebullición diferenciados (Cedeño et al., 2019). dependiendo del tipo de muestra y de analito a purificar, esta técnica basa su eficacia de separación en las diferencias de presiones de vapor de dos o más sustancias en solución y consiste en ebullicir la sustancia más volátil y recondensarla (Íñiguez, 2010).

No existe una fecha exacta para determinar cuándo se comenzaron a utilizar, sin embargo, desde los egipcios y árabes utilizaron esencias naturales como antiinflamatorios, analgésicos y desinfectantes, además como remedios naturales contra dolores musculares, reumatismo, resfriados, dolores estomacales, de cabeza y dentales, enfermedades de la piel, ojos y oídos e incluso existen evidencias que llegaron a utilizar algunas mezclas de esencias naturales como anestesia para operaciones quirúrgicas. En China alrededor del año 800 a. C. la técnica de destilación se usaba para obtener alcoholes procedentes del arroz y los árabes fueron los primeros responsables en obtener perfumes a partir de la destilación de frutas y flores, así como triturados minerales para obtener maquillajes utilizados como pintura para los ojos de las mujeres del harén. En la Edad Media la destilación se practicaba en los monasterios y los alcoholes que se obtenían se utilizaban con un fin terapéutico (Grande Verdugo & Ortiz Blanco, 2019).

Actualmente se han diversificado los usos y aplicaciones de las esencias naturales, desde formar parte activa de medicamentos y darles olor y sabor a jarabes, emulsiones, pomadas y tabletas. En el sector alimenticio se utilizan para intensificar el olor y sabor de productos envasados, empaquetados o enlatados. En las bebidas tanto alcohólicas como no alcohólicas se ha tenido un aumento vertiginoso, además de tener una tendencia hacia lo natural y orgánico, impulsado su producción. De igual forma en varias industrias como perfumería, cosméticos y productos del cuidado personal existe una gran tendencia a la utilización de sustancias naturales debido a que tienen menores efectos secundarios negativos (Munir et al., 2014).

La producción de esencias naturales tiene dos grandes limitantes, lo que provoca que los costos de producción se eleven; primeramente, se necesita de una gran cantidad de materia prima para producir unos cuantos mililitros de esencia natural y el proceso de producción es muy lento además de utilizar gas butano lo que provoca un gran consumo de combustible. para reducir los costos se han implementado alternativas de combustibles (madera, carbón, neumáticos, basura) sin embargo esto provoca la contaminación de las esencias naturales obteniendo un grado de pureza insuficiente para la mayoría de las aplicaciones, además de producir más contaminantes al medio ambiente (Ambuludí, 2014).

No es posible ofrecer una solución a la primera limitación ya que por naturaleza las esencias naturales se encuentran en cantidades muy pequeñas en comparación con la masa total que se utiliza como materia prima, por lo cual nos centramos en presentar una solución viable para la segunda limitante mediante la sustitución del gas butano por una energía renovable. Como solución alternativa se presenta un destilador solar combinado y automatizado, capaz de obtener esencias naturales utilizando energía solar, además el destilador tiene un subsistema para sufragar las pérdidas de temperatura debidas a nubosidad o algún otro factor climatológico.

Este artículo presenta una descripción de los destiladores solares, así como sus aplicaciones en la destilación, en segundo lugar, se describe la metodología empleada en el escrito específicamente Jenkins, en tercer lugar, se describe detalladamente el problema y una solución alternativa a través del diseño de un destilador solar. Seguidamente, se presentan los hallazgos de la prueba del sistema sugerido, Por último, se presentan los resultados y conclusiones, donde se encuentran las principales contribuciones de esta investigación.

Revisión de Literatura

La destilación solar es un proceso complejo debido a la variabilidad de la fuente de energía debido a múltiples factores climatológicos, así como a las diferentes transformaciones energéticas que ocurren

durante el proceso, que incluyen evaporación, condensación, decantación, enfriamiento, transferencia de calor por contacto, conducción y convección. Por lo tanto, existe una pérdida de calor y volumen como resultado de la evaporación, condensación, decanta, enfriamiento, transferencia de calor por contacto, conducción y convección, por lo tanto, existe una carrera entre los diferentes modelos que se presentan en la literatura por presentar mejores resultados de producción en volumen, en la reducción de tiempos e incluso en el costo y tamaño de los destiladores solares.

Se realizó la búsqueda del estado del arte para poder revisar los avances en este campo; encontrando destiladores de tipo caja donde en su interior se replica el efecto invernadero; tienen un recubierta de material reflejante en el cual los rayos solares pueden entrar al interior del receptáculo, pero por el material de la cubierta ya no pueden volver a salir, existen varios modelos de este tipo, un ejemplo lo encontramos en la Figura 1 (Marchesi et al., 2009).



Figura 1. Destilador solar para potabilización de agua.

Encontramos destiladores solares de tipo caja con acumulación de energía, los cuales consisten en un módulo destilador con una superficie de batea de 1 m² y con cubierta asimétrica desmontable de vidrio. Estos destiladores permiten una única orientación para su operación, de esta forma la radiación solar ingresará al destilador por la placa de vidrio principal (Terrés et al., 2008) tienen en su parte inferior un tanque acumulador de acero inoxidable. Véase Figura 2 (Fasulo et al., 2008).



Figura 2. Destilador con acumulador de energía.

Se analizo una estufa solar capaz de reflejar la energía solar mediante 450 espejos en un punto focal donde se cocinaron 4.5 kilogramos de carne de oveja en un tiempo de 3 horas y 25 minutos con lo cual podemos sustentar que mediante un sistema parabólico de concentración solar se pueden alcanzar las temperaturas suficientes para la destilación, como se ilustra en la Figura 3 (Olivares, 2009).



Figura 3. Estufa solar.

Existen varios modelos de estufas o concentradores solares y todos operan bajo el mismo concepto: reflejar una cantidad de iluminación captada por el área total del concentrador en un punto focal donde esa energía luminosa se transforma en energía calorífica.

En estos diseños se busca mejorar las relaciones de transferencia de calor al tomar en cuenta todos los parámetros, condiciones ambientales y configuraciones geométricas posibles. La tendencia actual es el diseño de procesos reales sustentables, viables técnica y económicamente (Torchia-Núñez et al., 2010).

Los concentradores esféricos se diferencian en que su superficie colectora es la mitad de un cilindro, teniendo como principal aplicación la producción de vapor. Debido a la concavidad de su geometría, en el foco se coloca un conducto por donde pasa un fluido como aceite o salmuera. Dependiendo de la longitud de exposición, el área de captación solar y la irradiancia, el líquido se calienta por encima del punto de ebullición. Una vez caliente, el fluido pasa a una caldera donde calienta agua y la convierte en vapor como se ilustra en la Figura 4 (Portela, 2018).



Figura 4. Concentrador cilíndrico.

En los concentradores parabólicos se dirigen los rayos solares en un punto mediante procedimientos ópticos, la radiación solar que entra a un concentrador a través de una superficie determinada es reflejada, para luego ser transformada en energía térmica (Máximo et al., 2020). La ventaja de este tipo de concentradores es la reducción de la pérdida térmica en el receptor, pues al ser éste de menor superficie habrá menos área para la radiación de calor. Los rayos solares se concentran mediante espejos y geometrías parabólicas como se observa en la Figura 5 (Servín et al., 2015).



Figura 5. Concentrador parabólico.

Metodología

Se implementó una metodología sistémica, para cumplir con los objetivos planteados para el desarrollo de un producto mínimo viable de un destilador solar combinado con estabilización de temperatura (Ossa, 2004) como se muestra en la Figura 6.

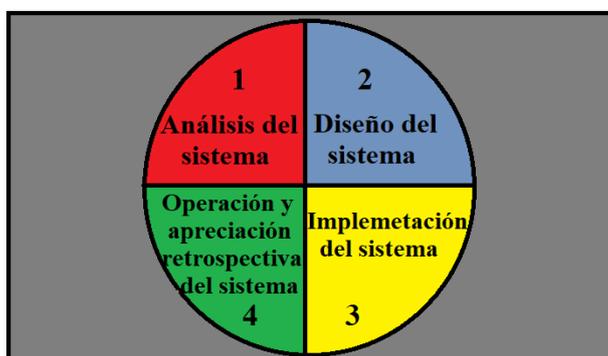


Figura 6. Metodología sistémica de Jenkins.

1. Análisis del sistema (Identificación del problema)

El proceso de extracción de aceites esenciales se llama destilación y para realizarlo se necesita de calor producido por la combustión de gas butano, es decir, entre más aceite esencial se desee producir, más se incrementará el gasto de este hidrocarburo. por lo tanto, la producción de aceites esenciales y su precio dependen de la oferta y demanda del gas butano.

Con otros métodos de destilación el precio de los aceites es aún más elevado, debido a que es necesario llevar a cabo varios procesos químicos mediante el uso de numerosos reactivos químicos, lo que supone un aumento del costo de producción y contaminación del medio ambiente, además de utilizar maquinaria especializada. En resumen, al producir aceites esenciales siempre se producen contaminantes. Por ello es necesario buscar alternativas para producir aceites esenciales sin dañar el medio ambiente.

Una posible solución la encontramos en la destilación solar, sin embargo, este proceso es sumamente inestable debido a la naturaleza periódica de la fuente de radiación y la baja eficiencia de los sistemas concentradores y/o reflectores de la radiación, además de que se presentan procesos simultáneos que es necesario controlarlos como; evaporación, condensación y transferencia de calor (Torchia-Núñez et al., 2010).

2. Diseño del sistema

Se diseñó y construyó un destilador combinado activado por concentración de energía solar como fuente principal y fotovoltaica como fuente secundaria. De concentrador se utiliza un plato parabólico con acabado

reflejante, automatizado para la producción de esencias naturales de cítricos capaz de reducir las variaciones de temperatura.

Se realizó el diseño del destilador solar combinado mediante un software de alto nivel de diseño mecánico (pro-ingenier) usando las normas internacionales American Society of Agricultural Engineers (ASAE) S580 y BUREAU Indian Estandrs (BIS) que establecen parámetros y modelos matemáticos para evaluar la potencia y la eficiencia térmica de los concentradores solares, (García Rubio et al., 2019) además de establecer estándares para ejecutar diferentes pruebas experimentales; se muestra el diseño del decantador con medidas estándares de laboratorio en la Figura 7, donde se realiza la separación del aceite esencial y los hidro-latos producidos.

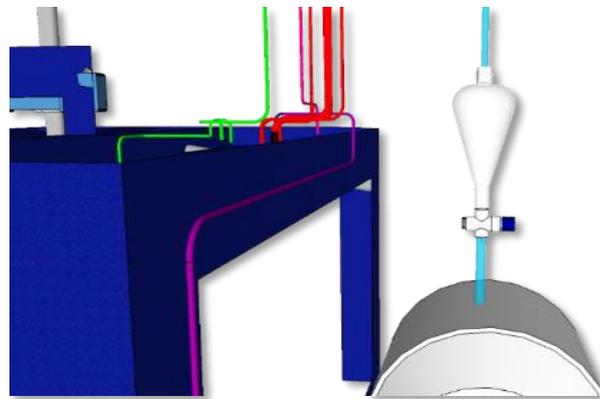


Figura 7. Decantador.

También se aprecia el tanque de almacenamiento y el tanque de alimentación de agua; ambos con capacidad de 4 litros en la Figura 8.

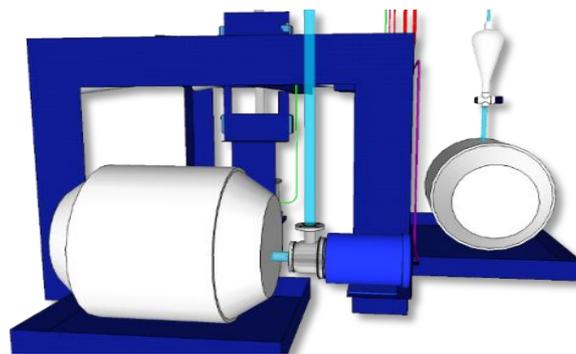


Figura 8. Depósitos.

La vista superior del plato parabólico con un diámetro de 1.45 metros con los cuatro sensores ópticos que se encargan de detectar el movimiento del sol en la Figura 9.

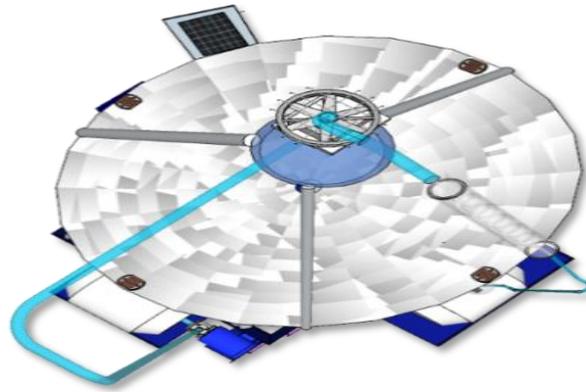


Figura 9. Vista superior.

Después de la simulación del destilador en 3D en el software se obtuvieron los planos con medidas y en la Figura 10 se muestra la vista lateral derecha del destilador con una altura total de 2.30 metros; donde se observa el plato parabólico de concentración solar, el sistema de destilación y el sistema de transmisión de movimiento.

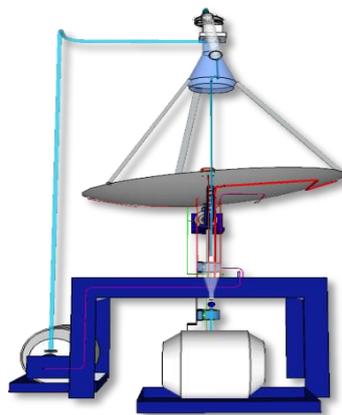


Figura 10. Vista lateral derecha.

En la Figura 11 se muestra el isométrico del destilador solar observando la estructura de soporte con un ancho de 1.20 metros y el sistema de control con medidas de 0.20 metros de ancho y 0.30 metros de largo.

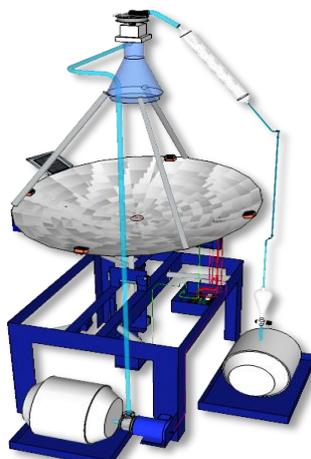


Figura 11. Vista Isométrica.

En la Figura 12 se observa el sistema de destilación, el cual es colocado donde incide el punto focal del plato parabólico conectado con la columna de refrigeración.

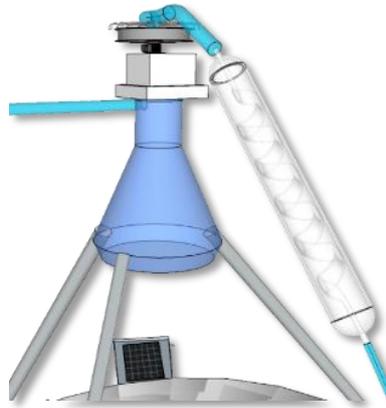


Figura 12. Columna de destilación.

Se desarrolló la programación mediante la plataforma de Arduino para poder detectar el movimiento del sol por medio de 4 sensores ópticos y poder controlar los motorreductores de 1.8 rpm a 9 volt, capacidad de 12 Kg. Estos motores acoplados a la transmisión mecánica (tornillo sin fin corona) y la estructura de soporte proporcionan un movimiento rotacional de 180 grados y uno azimutal de 90 grados para la orientación del concentrador (Ramirez Gil, 2021).

3. Implementación del sistema.

Se eligió el material de acuerdo con el cálculo y diseño, se midió y cortó de acuerdo con las medidas de los planos, se unieron las piezas mediante soldadura eléctrica y/o mecánicamente, finalmente se alienaron las piezas y se pintaron como se muestra en la Figura 13 a y b.

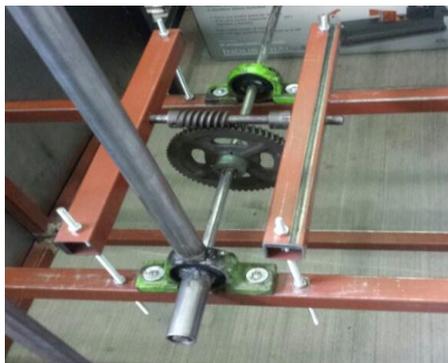


Figura 13(a). Transmisión mecánica.



Figura 13(b). Aplicación de pintura.

En seguida se acoplo el sistema de transmisión de movimiento, se conectaron los motores, se instaló del sistema de destilación y el sistema de control (Calderon et al., 2018). Posteriormente se instaló el sistema combinado mediante el calentador eléctrico tubular, un sistema de 4 paneles fotovoltaicos y un sistema de dos baterías de gel con su sistema de regulación de voltaje como se ilustra en la Figura 14.



Figura 14. Construcción del destilador solar.

Con el calentador tubular dentro del depósito cuando el sensor detecte la reducción de temperatura, entonces este calentador eléctrico compensara la temperatura.

A continuación, se muestran las características del segundo sistema que se combina con el de concentración solar:

Características del panel fotovoltaico: potencia máxima de 60w, voltaje en circuito abierto de 22 v, Voltaje en el punto de máxima potencia de 18 v, Corriente en el punto de máxima potencia de 3.33 A, medidas de 625mm por 835 mm y peso de 2 Kg.

Características del regulador de voltaje: Controlador de Carga Solar 1pc, 100A 60A 30A, regulador Inteligente de Panel Solar 12V/24V Con Pantalla LCD Ajustable, Puerto USB dual, temporizador de Parámetro Automático

Características de la batería de gel: Tensión Nominal de 12,8 V, capacidad Nominal de 100Ah, energía de 1440Wh, vida útil del ciclo mayor a 4000 ciclos, voltaje de carga de $14,6 \pm 0,2$ V, corriente del cargador de 20A, corriente máxima de carga: 50A, corriente de descarga: 20A, dimensiones (largo/ancho/alto): 380x210x265mm, peso: 27,5 kg.

Características del calentador eléctrico: potencia de 250w, calentador de inmersión automático de acero inoxidable. Voltaje: 24V 60HZ. Acero inoxidable + plástico PP. Este calentador debe tener al menos 5 cm de distancia entre el dispositivo con respecto de la superficie y el fondo del depósito.

4. Operación y apreciación retrospectiva del sistema

Se presenta el sistema mediante el funcionamiento bajo condiciones reales de proceso y obtención de resultados, en la Figura 15 se observa el funcionamiento del destilador solar combinado bajo condiciones normales de trabajo.



Figura 15. Pruebas de funcionamiento.

Instrumentación utilizada en las pruebas experimentales (Radwan et al., 2020)

Equipo: piranómetro hukseflux, 4 termómetros digitales, 4 termopares tipo K. de doble canal -HI935002, 1 luxómetro, 1 multímetro digital.

Herramientas varias (Desarmador de cruz y plano, pinzas: eléctricas, mecánicas, nivel de mano, regleta, escuadra).

Materiales de laboratorio (Matraz de fondo plano, mechero, pipeta, probeta, malla corchos, termómetro de vidrio, columna de destilación, bomba de agua, mangueras térmicas, pinzas de soporte, decantador).

Parámetros del lugar donde se realizaron las pruebas (Ixtapaluca, Estado de México): altura: 2,407 metros sobre el nivel del mar, latitud: 19° 31' 55" N, longitud: -98° 88' 28" W, inicio de la prueba: 11:00 horas de tiempo oficial = 9 horas, 43 minutos, 21 segundos tiempo solar, temperatura ambiente al inicio: 22.1 °C.

Se realizaron las mediciones con el luxómetro como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tabla de cantidad de Iluminación

Hora del día	Temperatura ambiente	Cantidad de Iluminación
11:00	21.3 °C	750 lux
11:20	21.4 °C	940 lux
11:40	21.6 °C	860 lux
12:00	21.8 °C	780 lux
12:20	22.1 °C	890 lux
12:40	22.2 °C	720 lux
13:00	22.5 °C	790 lux
13:20	22.7 °C	920 lux
13:40	22.6 °C	750 lux
14:00	22.7 C	870 lux

En la tabla anterior se observan las cantidades de iluminación medidas con el luxómetro a un costado del concentrador solar parabólico comprobando los rangos teóricos que se pueden alcanzar con la irradiación solar directa.

Para conocer la radiación total reflejada por el plato parabólico es necesario conocer la radiación instantánea por unidad de área que alcanza una superficie horizontal tomando en cuenta el ángulo sólido entre la tierra y el sol, y la variación cenital a lo largo del día.

Para calcular la reflexión teórica del plato parabólico primero se calcula el área del plato parabólico de la siguiente forma:

Con la fórmula 1 representamos el área lateral de un paraboloides:

$$A = \iint \sqrt{1 + [Fx(x,y)]^2 + [Fy(x,y)]^2} dA \quad \dots 1$$

Se obtienen las derivadas parciales y se sustituyen, posteriormente se factoriza el polinomio dentro de la raíz cuadrada, obteniendo la fórmula 2

$$A = \iint \sqrt{1 + 4(x^2 + y^2)} dA \quad \dots 2$$

Transformando las coordenadas polares con las siguientes sustituciones:

($x = r\cos\theta$, $y = r\sin\theta$, $x^2+y^2 = r^2$, $dA = r dr d\theta$)
con los siguientes intervalos: $0 \leq r \leq 1.45$ m y $0 \leq \theta \leq 2\pi$
obtenemos la fórmula 3:

$$A = \int_0^{2\pi} \int_0^{1.45} \sqrt{1 + 4r^2} r dr d\theta \quad \dots 3$$

Resolviendo por cambio de variable e integrando se obtiene la fórmula 4:

$$A = \frac{1}{12} \left[\left(\frac{\sqrt{941}}{10} \right)^3 - \sqrt{1} \right] [\theta]_0^{2\pi} \quad \dots 4$$

Evaluando los límites de la integral obtenemos el área lateral del paraboloides de 14.590 m² para el área total multiplicamos por dos y obtenemos 29.18 m².

Una vez obtenida el área del paraboloides procedemos a calcular la cantidad de luz solar que alcanza el suelo, tomando en cuenta la órbita elíptica de la tierra, como su atmósfera, indicando el número del día del año en que se realizó el procedimiento; conocido como fecha juliana. Por lo cual se utiliza la fórmula 5:

$$E_{ext} = ESC \left(1 + 0.034 \cos \left(\frac{2\pi(Jd - 2)}{365} \right) \right) \quad \dots 5$$

Donde:

E_{ext} = cantidad de luz solar que alcanza el suelo

ESC = constante de iluminación solar de 298 klux

Jd = número del día de año (utilizamos el día 156, que fue cuando iniciamos las pruebas, es decir el 4 de junio del 2023)

Sustituyendo los datos en la fórmula y calculando obtenemos:

$E_{ext} = 308.121 \times 10^3$ lux/m²

Calculamos el factor de corrección con la fórmula

$$E_{dn} = (E_{ext})(e^{-cm}) \quad \dots 6$$

Donde:

E_{dn} = cantidad de luz que alcanza la superficie del planeta

E_{dn} = factor de corrección de la cantidad de luz que

C = coeficiente de extinción atmosférica de 0.000028 correspondiente a la región de Norte América en la cual nos localizamos.

m = masa óptica relativa del aire de 1,367 w/m²

Sustituyendo y calculando obtenemos:

$$E_{dn} = 296,550.365 \frac{\text{lux}}{\text{m}^2}$$

Por lo tanto, en una superficie de 1 metro cuadrado se obtienen 296,550.365 lux provenientes del sol y con el dato del cálculo del área total del plato parabólico, calculamos la cantidad de iluminación que es capaz de captar el plato en forma de paraboloides igualando a “x”, obteniendo 8,653,636.201 lux.

Dividiendo el dato anterior entre el numero promedio de la cantidad iluminación real medida en la tabla 1 podemos entonces determinar que aproximadamente el plato parabólico diseñado y calculado es capaz de concentrar 10,000 veces la cantidad de iluminación que puede medir el luxómetro en un punto en particular expuesto a la irradiación directa justo a un metro por encima del suelo y en condiciones geográficas antes descritas. Con estos datos podemos argumentar teóricamente la transformación de la energía luminosa en energía calorífica mediante la concentración del plato parabólico referente en el punto focal.

Para las pruebas reales se utilizó agua potable en las pruebas con el destilador convencional, el destilador solar simple y el destilador solar combinado. Los días de prueba no se escogieron tomando en cuenta pronósticos climatológicos con el objetivo de que las pruebas fueran con clima completamente al azar y los resultados fueran lo más objetivos posibles. las esencias naturales de los cítricos se encuentran entre las más utilizadas para proporcionar olor y sabor a medicinas, alimentos, bebidas, maquillajes, productos de limpieza etc.; por lo cual se eligió la naranja como producto de esencia a obtener y como materia prima para todas las pruebas de este experimento. Además, México es uno de los principales exportadores de cítricos y son algunos de los frutos más abundantes y económicos del país. Se utilizaron diferentes variedades de naranja las cuales pueden diferir en dulzura, acidez, tamaño, grosor de cascara, numero promedio de semillas por fruto, cantidad de jugo, nivel de madurez, color y sabor lo que puede provocar pequeñas diferencias en las cantidades de esencia natural obtenida. Si se comparan las producciones de esencia de naranja en cantidades industriales la se alcanza la superficie del planeta.

Resultados y Discusión

La destilación solar pertenece al estudio de los sistemas de energías renovables, los cuales en general no han logrado superar a los sistemas convencionales que utilizan derivados del petróleo o materiales nucleares al grado de sustituirlos o desaparecerlos. Una de las principales razones es la baja eficiencia energética con respecto de su costo y del espacio que utilizan, por lo tanto es necesario rediseñar sistemas y/o procesos en los cuales mediante la fusión de dos o más sistemas de energías renovables se pueda competir contra los sistemas tradicionales que utilizan hidrocarburos y precisamente esa es la principal aportación del presente trabajo presentar un destilador solar que funciona la concentración de energía solar mediante un sistema óptico y un sistema de almacenaje de energía mediante baterías y paneles fotovoltaicos que al menos pueda competir o superar un sistema básico de destilación que utiliza gas butano, sin lugar a duda la automatización de los sistemas de energías renovables es imprescindible para el aumento de eficiencia de estos y lo comprobamos en los resultados que se presentan a continuación mediante las gráficas registradas.

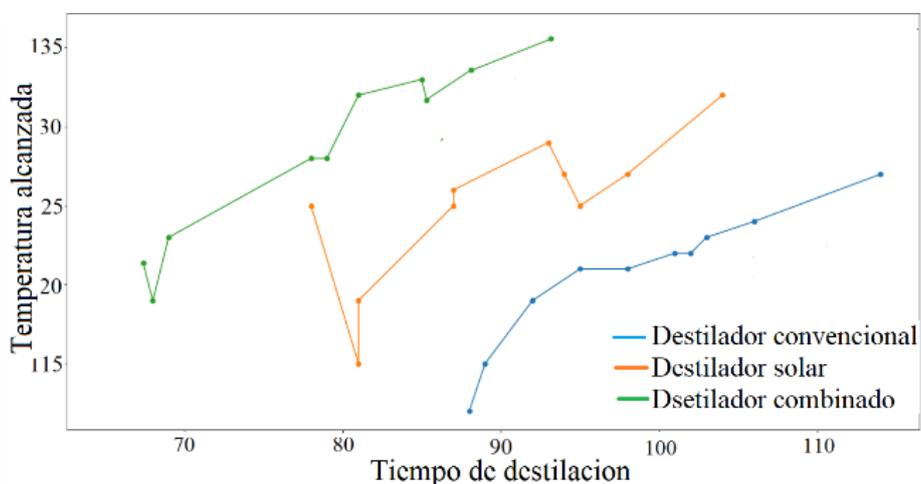


Figura 16. Temperaturas alcanzadas por los tres destiladores.

En la gráfica de la Figura 16 se comparan los tres destiladores: destilador convencional de laboratorio de gas butano, destilador simple de concentración solar mediante plato parabólico y destilador combinado de concentración parabólica con un sistema térmico en el interior del depósito de destilación alimentado por

baterías cargadas con paneles fotovoltaicos, las pruebas se realizaron con las mismas cantidades de materia prima y agua. Observamos que los tiempos necesarios para llevar a cabo el proceso de destilación son entre 10 y 15 minutos menores en el destilador combinado en comparación con el destilador simple y entre 10 y 20 minutos menores en comparación con los tiempos de producción de un destilador tradicional de laboratorio utilizando gas butano. En el destilador solar de concentración parabólica podemos observar que los cambios de temperatura son más frecuentes y además de que las variaciones de temperatura son mayores y pueden oscilar entre los 10 y 40 °C, dependiendo completamente de la variación de la fuente de radiación solar interferida por los lapsos de nubosidad, esta característica provoca que el proceso de destilación sea interrumpido provocando tiempos mayores de producción y cantidades menores de aceite esencial obtenido en comparación con tiempos de producción similares pero con periodos completamente soleados. En el destilador combinado podemos observar que las variaciones de temperatura son menores comparado con el destilador de concentración parabólica por lo cual podemos considerar que el sistema de calentamiento con el sistema cargado de baterías con los paneles fotovoltaicos cumple con el objetivo de compensar las pérdidas de temperatura debido a efectos climatológicos adversos. Aun con el sistema para estabilizar la temperatura es imposible eliminar por completo las variaciones de temperatura debido al tiempo de recesión del sistema, dependiendo del nivel de carga de las baterías y del tiempo que necesita la diferencia de producción por utilizar diferentes variedades de naranja suele ser despreciable, sin embargo, en pruebas de producción experimentales si se pueden apreciar las diferencias en las cantidades de esencia natural obtenida.

La temperatura del depósito tiene más puntos de inflexión debido a que depende de los cambios de la concentración de irradiación solar y de los cambios de temperatura del fluido provocados por el sistema de calentamiento interno, por lo tanto, tenemos menos puntos de inflexión en la temperatura del fluido debido al sistema de compensación de temperatura y cuando detecta disminución de la temperatura (de 2 °C a 5 °C) el sistema secundario de inmediato comienza a tratar de corregir la temperatura.

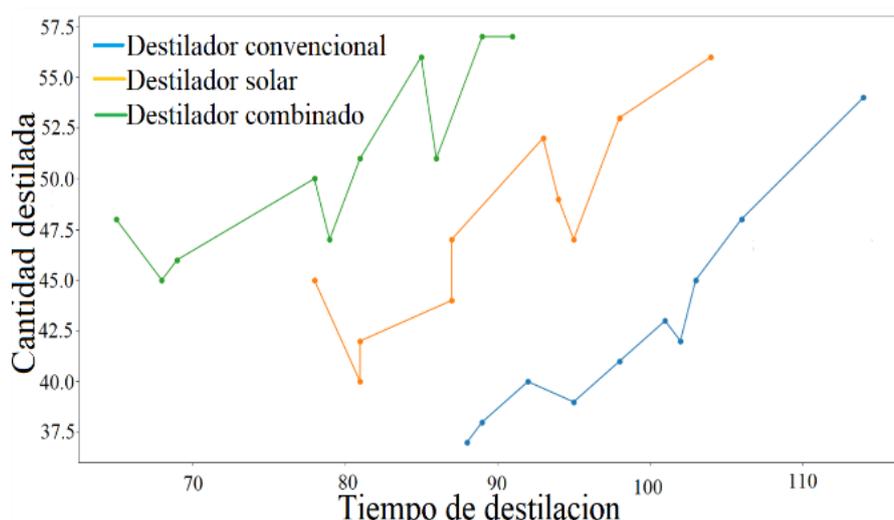


Figura 17. Comparación de la producción.

En la gráfica de la Figura 17 se compara un destilador de laboratorio convencional trabajando con mechero de gas butano, un destilador de concentración solar con reflejante de tipo parabólico y un destilador solar combinado es decir un destilador de concentración solar con reflejante de tipo parabólico sumando el sistema de calentamiento eléctrico mediante sistema fotovoltaico con calentador de tipo tubular; interno en el depósito de destilación, se comparó los tres destiladores durante un periodo de 10 días consecutivos en condiciones iguales de reactivos, en la cual notamos que el tiempo necesario para la destilación es 15 minutos menor en el destilador solar combinado en comparación con el destilador solar simple y 25 minutos menor en comparación con el destilador tradicional que utiliza gas. Sabemos que en un destilador de gas el tiempo del proceso se puede reducir con el aumento de la llama sin embargo esto se vuelve impráctico ya que también aumenta el gasto del combustible y por la tanto el costo del proceso. Con respecto a la cantidad de aceite destilado obtenido se observa que de forma general podemos obtener entre 5 y 10 ml en el destilador combinado con respecto al destilador solar simple y entre 10 y 15 ml con respecto a un destilador convencional de laboratorio; podría parecer que la diferencia no es tan significativa tomando en cuenta los recursos utilizados, sin embargo como se comentó en la introducción las cantidades de aceite esencial

obtenido con respecto a la cantidad de materia prima y combustible utilizado son muy pequeñas, por lo cual calculando en términos de porcentaje de producción podemos tener un aumento entre el 3 y el 9 % de aceite obtenido. En los tres tipos de destiladores comparados en esta prueba existen cantidades diferentes de producción de aceite producido comparado entre los diferentes días por eso en la gráfica observamos aumentos y disminuciones en esta variable incluso si comparamos con aumento en los tiempos de destilación, esto es debido a que la cantidad de aceite esencial presente en este caso en las cascara y semillas de la naranja puede resultar ser sumamente variada, dependiendo del número y sistema de calentamiento elevar la temperatura para poder estabilizar el proceso de destilación.

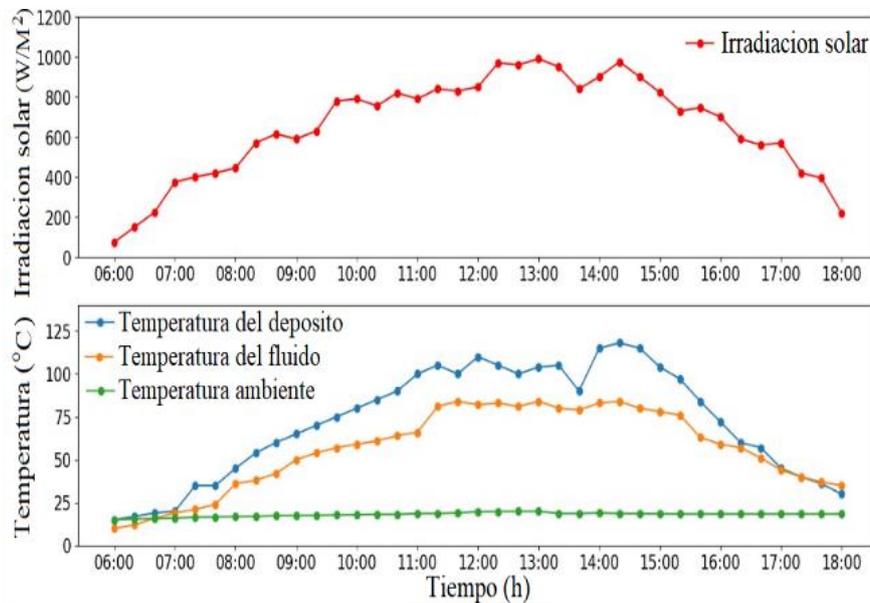


Figura 18. Comparación de temperaturas e irradiación solar.

En gráfica de la Figura 18 se comparan las tres temperaturas en el destilador solar combinado con respecto de la hora de un día normal que se pueden medir y que pueden afectar de manera directa e indirecta el proceso de producción de aceites naturales, primeramente podemos observar que la temperatura ambiente, aunque aumenta desde las 6 a.m. y tiene su punto máximo pasando del medio día y luego empieza a decrecer durante la tarde; es el factor que tiene menos variación comparada con la temperatura de depósito y la interna que es la del fluido. La temperatura ambiente influye de tal manera que dependiendo de ella al principio del proceso destilación entre sea menor su valor le llevara más tiempo al destilador solar alcanzar la temperatura necesaria. Por otro lado podemos observar que la temperatura del depósito y del fluido están directamente relacionadas con la irradiación solar que refleja el plato parabólico en su punto focal; en el cual está localizado el depósito de destilación, es decir durante la mañana comienza a aumentar su valor alcanzando su valores máximos pasando el medio día lo que provoca el mismo efecto en las temperaturas del depósito y del fluido, cuando se acerca el medio día las temperaturas sufren un crecimiento debido al aumento de concentración de irradiación solar. Por la tarde sucede exactamente lo contrario comienza a descender la irradiación solar provocando la disminución de las temperaturas del depósito y del fluido, concluyendo que el valor de la concentración de irradiación solar es directamente proporcional al valor de las temperaturas del depósito y del fluido. La irradiación tiene múltiples variaciones en su magnitud y esto es debido a cambios en la nubosidad, a la irradiación difusa, reflexión solar total del suelo e inclusive a factores climatológicos. Con respecto al comportamiento de las temperaturas del depósito y del fluido vemos que su comportamiento es similar en todo el proceso y esto es debido a que la temperatura del fluido es directamente influenciada por la temperatura del tamaño de las semillas, la cantidad de albedo que no se puede desprender de la cascara e incluso del nivel de maduración del fruto y de la especie en particular de la planta que produjo en fruto.

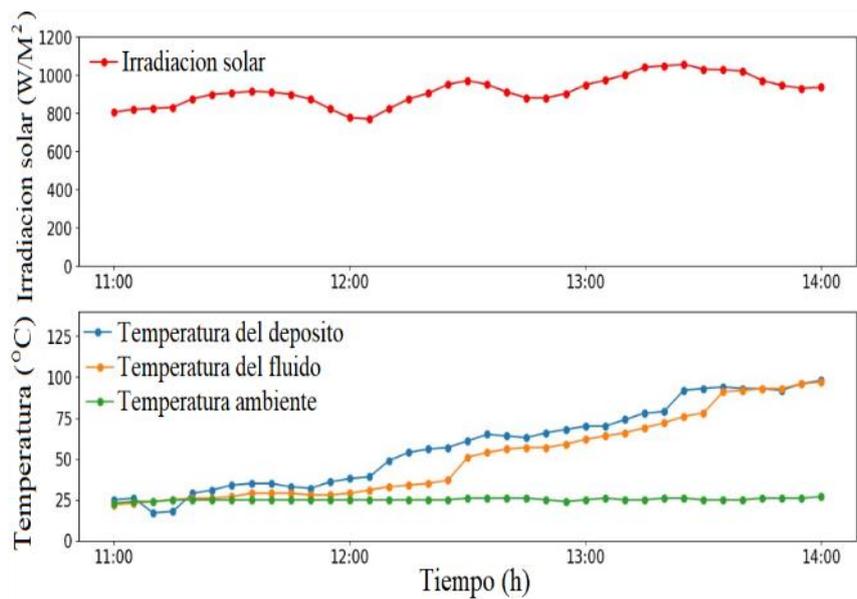


Figura 19. Comparación de temperaturas del destilador combinado y la irradiación solar.

En la gráfica de la Figura 19 observamos el comportamiento de las tres temperaturas que influyen en el proceso de destilación. El lapso del tiempo se eligió porque es el periodo en el que encontramos el máximo crecimiento de temperatura, además es el tiempo necesario para analizar un proceso completo de destilación. Estos experimentos se realizaron en días diferentes con respecto de las pruebas del experimento anterior; observamos que la temperatura ambiente no tiene variaciones significativas, ni crecimiento tan pronunciado como la temperatura del depósito y del fluido. Las temperaturas del fluido y del depósito sufren un crecimiento más uniforme, no se observa ningún punto de flexión en la temperatura del fluido y solo dos puntos de flexión en la temperatura del depósito. Al principio observamos el único decremento que tiene la temperatura del depósito, pero es muy pequeño comparado con todo el crecimiento a lo largo del proceso de destilación, el cual puede ser producto de múltiples factores ambientales, sin embargo, notamos que este decremento no afecta de manera significativa el comportamiento de la temperatura del depósito, debido que la temperatura interna también está siendo influenciada por el calentamiento del sistema eléctrico fotovoltaico. Después de las 13:30 observamos que las temperaturas del depósito y del fluido son prácticamente iguales lo que supone las condiciones óptimas para el proceso de destilación además de reducir el depósito y viceversa, es decir existe transferencia de calor del depósito al fluido por la concentración calorífica del plato parabólico y existe transferencia de calor del fluido al depósito cuando disminuye la temperatura y el sistema combinado trata de compensar la temperatura con el calentador eléctrico interno al depósito. Su empleo no debe pasar por argumentos teóricos, sino por viabilidades de material, costos y mantenimiento.

Conclusiones

En el estado del arte revisado correspondiente a todos los diseños y modelos de destiladores solares además de captadores o concentradores solares; no se encontró ningún destilador que utilice simultáneamente dos sistemas de calentamiento además de poseer un sistema de control de temperatura que permita el control de temperatura y la posibilidad de corregir esta variable mediante un sistema de lazo cerrado.

En los destiladores encontrados y consultados en la bibliografía no se encontró destiladores automatizados que sean capaces de controlar movimientos rotacionales y azimutales mediante motores y sistemas de transmisión mecánica que protejan al sistema de fuerzas externas como el viento, además del control de detección y corrección de la temperatura.

La metodología utilizada en esta investigación fue de suma importancia ya que mediante su aplicación se logró describir las necesidades del sistema desde múltiples aristas como, por ejemplo: factor energético, resultados esperados, automatización, selección de materiales, fenómenos físicos y químicos inmersos en el proceso de destilación y la ampliación de la destilación solar a otras aplicaciones.

Un destilador solar combinado es un dispositivo de alta eficiencia, según la segunda ley de la termodinámica no existe maquina térmica perfecta y la discusión de las perdidas por transferencia de calor.

El fenómeno de destilación solar es un proceso sumamente inestable donde se tiene concentración de energía, transformación de energía luminosa a energía calorífica, evaporación, presión de vapor, convección, conducción y radiación de calor, condensación, decantación y perdidas de energía en diferentes formas y etapas del proceso. Sin embargo, con el suficiente control de sus variables se ofrece una opción viable para la producción de esencias naturales mejorando tiempos y costos de producción.

Los resultados muestran que la irradiancia solar es el parámetro más influyente en los procesos de transferencia de calor dentro del destilador, seguido por el calentamiento interno del depósito con el sistema combinado.

Las ventajas del destilador solar combinado surgen a partir de la posibilidad de incorporar energía desde el exterior en forma de energía eléctrica y que no la tienen los destiladores solares normales.

Los resultados indican que una mayor temperatura ambiente contribuye a una mayor producción de destilado, debido a que la diferencia es menor entre la temperatura inicial y la temperatura de destilación, sin embargo, resulta ser el parámetro menos influyente en el proceso de destilación solar (Hilali et al., 2019).

La conversión entre fracción masa y fracción volumen, no representa mayor problema para aquellos componentes que forman soluciones ideales, siendo una característica que el proceso de mezclado no altera los volúmenes iniciales de los componentes de la mezcla, es decir que no es necesario ningún tipo de molienda y/o mezclado de la materia prima con el agua para el presente proceso (Munir, & Hensel, 2010).

Referencias bibliográficas

- Ambuludi, G. M. (2014). *Implementación de un destilador simple para la obtención de etanol a partir del penco azul (agave americana) para la planta de alimentos del campus Juan Lunardi Paute*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador: URL: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7479/1/UPS-CT004414.pdf>
- Calderon, C. A., Gutierrez, J. P., Alvarez, L., Granda, D., Valarezo, E., & Ramirez, C. (2018, June). PLC-based temperature controller applied to a distiller of essential oils by water-steam drag. In 2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2018.8399308>
- Cedeño, A., Moreira, C., Muñoz, J., Muñoz, A., Pillasaguay, S., & Riera, M. A. (2019). Comparación de métodos de destilación para la obtención de aceite esencial de eucalipto. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 6(1), 1-13. <https://acortar.link/IHa8IT>
- Fasulo, A. J., Odicino, L. A., Adaro, J., Marchesi, J. O., & Dúcculi, E. (2008). Destilador solar con acumulación de energía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/95115>
- García Rubio, M. Á., Cevallos Patrón, S., & Abadía Ángel, D. (2019). *Diseño y construcción de una estufa solar*. Universidad Iberoamericana Puebla. 1-30. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.11777/4212>
- Grande Verdugo, J. C., & Ortiz Blanco, S. (2019). *Destilación simple y fraccionada: Método de purificación de líquidos*. Universidad Industrial de Santander, 1-6.
- Hilali, S., Fabiano-Tixier, A. S., Ruiz, K., Hejjaj, A., Ait Nouh, F., Idlimam, A., ... & Chemat, F. (2019). Green extraction of essential oils, polyphenols, and pectins from orange peel employing solar energy: Toward a zero-waste biorefinery. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(13), 11815-11822. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02281>
- Íñiguez, J. (2010). Algunas consideraciones teórico-prácticas sobre la destilación intermitente en alambique simple de mostos fermentados, y ordinarios. *Facultad de Ingeniería – Revista Ingeniería Primero*, 17, 31-51.
- Marchesi, J. O., Galimberti, P. D., Tobares, N., Adaro, J., & Fasulo, A. J. (2009). Determinación experimental de la producción de un destilador solar respecto a la temperatura del agua en la batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 1-7
- Máximo, M. M., Avilés, M. G., & Campuzano, H. S. (2020). Diseño y análisis de un sistema solar CPC de revolución para la cocción de alimentos simultáneamente. *14 Congreso de ciencia y tecnología e Innovación Michoacán*, 1-6.

- Munir, A., & Hensel, O. (2010). On-farm processing of medicinal and aromatic plants by solar distillation system. *Biosystems engineering*, 106(3), 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.03.016>
- Munir, A., Hensel, O., Scheffler, W., Hoedt, H., Amjad, W., & Ghafoor, A. (2014). Design, development and experimental results of a solar distillery for the essential oils extraction from medicinal and aromatic plants. *Solar energy*, 108, 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.028>
- Olivares, A. E. (6 de Marzo de 2009). *Científicos del IPN trabajan en una estufa solar para uso urbano*. LA JORNADA, págs. 2-6 URL: <https://www.jornada.com.mx/2009/03/06/ciencias/a02n1cie>
- Ossa, C. A. (2004). *Teoría General de Sistemas*. Colombia: Gráficas Olímpica. URL: <https://acortar.link/PdzaCm>
- Portela, G. (2018). *Concentrador Cilíndrico Parabólico*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/325248453>
- Radwan, M. N., Morad, M. M., Ali, M. M., & Wasfy, K. I. (2020). A solar steam distillation system for extracting lavender volatile oil. *Energy reports*, 6, 3080-3087.
- Ramirez Gil, R.J. (2021). Assessment of the thermal performance of a parabolic solar stove. *LADEE*, 2, 16-24. DOI: 10.17981/ladee.02.02.2021.2
- Servín, H., González-Avilés, M., & Morales-Máximo, M. (2015). Desarrollo de una estufa solar para varios contenedores. In *Memorias en extenso del Congreso Internacional de Energía* (Vol. 1, pp. 297-301).
- Terrés, H., Ortega, A., Gordon, M., Morales, J. R., & Lizardi, A. (2008). Evaluación de reflectores internos en una estufa solar de tipo caja. *Científica*, 12(4), 175-183.
- Torchia-Núñez, J. C., Porta-Gándara, M. A., & Cervantes-de Gortari, J. G. (2010). Steady-State Exergy Analysis of a Simple Solar Still. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(1), 25-34.