

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

PROGRAMA DE ENERGÍA

**Diseño y construcción de un evaporador
solar para la obtención de miel de agave**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA:

ROBERTO ESPINOSA GONZÁLEZ

DIRECTOR

DRA. MA. CLAUDIA ROLDÁN AHUMADA

Ciudad de México, agosto de 2018



SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

INTEGRACIÓN DEL JURADO:

Presidente: Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas (UACM)

Secretario: Dra. Ma. Claudia Roldan Ahumada (UACM)

1er. Vocal: Dra. Joanna Juárez Michua (UAEM)

2do. Vocal: MI. Raúl Almilcar Santos Magaña (UACM)

Lugar donde se realizó el posgrado:

PLANTEL DEL VALLE, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Ma. Claudia Roldan Ahumada

Agradecimientos y dedicatorias

A lo largo de la realización del presente proyecto recibí un gran apoyo de diversa índole, por el cual, quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. Claudia Roldán Ahumada y al Dr. Fernando Arroyo del Programa de energía UACM plantel del Valle, por su tiempo y apoyo constante. De la misma manera agradezco también a la Dra. Joanna Juárez Michua de la UAEM, por sus atinadas y pertinentes observaciones

Doy las gracias a mis amigos y familiares que me apoyaron:

Dr. Javier Pereyra Venegas, Ing. Juan Carlos Ramírez Lujano, QBP Alejandro Arcos Casarrubias Ing. Heli Espinosa González, Sc. Carolina Cisneros Cortés y Aranza Quiroz Cisneros.

Dedico este trabajo a mis hijos; Ana Isabel, Roberto Balam y Paola Monserrat Espinosa Morales y a mi madre Isabel González Hernández que son la fuente de motivación para esforzarme siempre.

Agradezco a la UACM en especial a los profesores del Programa de energía por sus enseñanzas, su disposición y compromiso.

Agradezco también el apoyo para impresión y/o empastado de trabajo recepcional o tesis 2018.

Diseño y construcción de un evaporador
solar para obtención de miel de agave

Índice

Introducción.....	8
Objetivo.....	9
Objetivos específicos.....	9
Justificación.....	10
Hipótesis de trabajo.....	12
Metodología.....	12
Capítulo I	
1. Antecedentes	
1.1 La planta de maguey.....	14
1.2 Producción de aguamiel	14
1.2.1 Composición química.....	15
1.2.2 Recolección.....	16
1.3. El sol como fuente de energía.....	17
1.3.1 Irradiación solar en México.....	17
1.3.2 Uso de la energía solar térmica.....	19
1.4 Concentrador parabólico compuesto CPC.....	21
Capítulo II	
2. Estudio de caso.....	23
2.1 Características del sitio.....	23
2.2 Localización.....	26
2.3 Recurso solar en Contepec, Mich.....	28
2.4 Producción de miel de agave.....	30
2.4.1 Proceso actual de producción de miel de agave.....	31
2.4.2 Producción de miel de agave empleando energía solar.....	32
2.4.3 Subproductos	33
2.5 Destiladores o evaporadores solares	34
2.5.1 Principales tipos de evaporadores solares.....	34

2.5.2 Factores que influyen en el desempeño de los destiladores solares...	40
2.6 Selección del evaporador solar.....	41

Capítulo III

3. Bases de diseño

3.1 Disponibilidad de materia prima.....	43
3.2 Estacionalidad de la operación.....	44
3.3 Volumen de operación	45
3.4. Energía y potencia solar.....	45
3.5 Cálculo del concentrador parabólico compuesto (CPC)	47
3.6 Construcción del destilador solar de tubo con CPC.....	51
3.7 Problemática.....	57
3.8 Requerimientos energéticos auxiliares.....	57

Capítulo IV

4. Resultados

4.1 Evaporador solar.....	59
4.1.1 Descripción del evaporador solar.....	60
4.1.2 Descripción del funcionamiento del evaporador solar.....	66
4.1.3 Perfil de temperatura en condensador y evaporador solar.....	68
4.1.4 Porcentaje de evaporación	70
Conclusiones.....	72
Recomendaciones.....	73
Anexo I Sistema de variables.....	76
Anexo II Instrumentos de recolección de datos.....	78
Anexo III Propiedades térmicas y ópticas de materiales utilizados.....	79
Anexo IV Glosario.....	80
Referencias.....	81

Resumen

En los últimos 50 años la humanidad ha cambiado los ecosistemas más rápida y extensivamente que en cualquier periodo comparable de la historia. La obtención desmesurada de biomasa, leña en particular, conlleva a la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y la degradación de los suelos. El empleo de combustibles fósiles como fuentes de energía ha generado un incremento desmesurado de gases de efecto invernadero. El uso y aprovechamiento de las energías renovables es indudablemente la alternativa de la que debemos echar mano para enfrentar la contaminación atmosférica y el cambio climático.

La presente es una investigación de corte cuantitativo que ha tomado el método experimental como base metodológica. Con la realización del presente proyecto se pretende demostrar la tesis, sobre que la producción de miel de agave utilizando energía solar como fuente de energía, es un proceso sustentable, ambiental y energéticamente posible. La alternativa que se plantea para producir la miel de agave es sustituir el tipo de fuente de energía empleada, biomasa o gas LP, por energía solar térmica. La construcción de un dispositivo que concentra la energía solar del sol, incrementa la temperatura de un material absorbedor y la emplea para efectuar la evaporación de aguamiel para obtener un concentrado, es el eje central del presente trabajo. El rendimiento dado por el evaporador solar depende de los factores como irradiancia, velocidad y otros factores climatológicos, además de las propiedades fisicoquímicas del fluido a evaporar. El diseño del concentrador parabólico compuesto, CPC, ha sido tomando en cuenta el análisis del truncamiento óptimo, así, ha sido material y económicamente posible la construcción del dispositivo. El CPC ha jugado un papel de suma importancia para lograr la temperatura requerida en el absorbedor. Una vez que se ha realizado la construcción del evaporador solar pudieron realizarse pruebas operativas. Se monitoreó la Temperaturas en absorbedor, condensador, aguamiel y en el condensado, además de irradiancia y flujo. Se obtuvo un porcentaje de evaporación del aguamiel del 71%, consiguiendo con ello una importante evaporación parcial. Además de obtener un condensado a 42° C, cuyo calor puede ser utilizado.

Introducción

En el capítulo I se hace referencia a los antecedentes, se incluye información sobre el agave y la producción de agua miel, algunas de sus propiedades físicas y químicas así como de su proceso de obtención. Se expone también acerca de la energía solar su magnitud y la utilización de energía solar térmica en México

En el capítulo II se realiza un análisis del caso particular: La realización del proyecto en uno de los municipios del estado de Michoacán, Contepec, donde históricamente se cultiva y crece el agave mexicano. Materia prima indispensable para la producción de agua miel. Se habla del aprovechamiento de los subproductos del proceso y la elaboración del producto principal el sitio. Han sido incluidas también las determinaciones de la irradiancia. Además se comparan varias de las alternativas existentes para evaporadores solares.

En el capítulo III se muestran las bases de diseño para el evaporador solar que se utilizará en el proceso de obtención de miel de agave. La materia prima requerida, estacionalidad, volumen de operación, materiales empleados para el evaporador, el cálculo del concentrador, el dimensionamiento de los destiladores, tanto de tubo como de pirámide, y su estructuración.

En el capítulo IV se muestran los resultados. Se hace una descripción del prototipo construido, se describe también como es el funcionamiento del evaporador solar, las variables monitoreadas han sido el flujo, la irradiancia, las temperaturas en evaporador, condensador y en el fluido y el condensado, las pruebas operativas del evaporador solar para la obtención del porcentaje de evaporación que ha resultado ser de 71 % para un flujo de 0.45 litros/hora. En la parte ultima se presentan las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo de la realización del proyecto, se anotan algunas recomendaciones para un seguimiento futuro. Se incluye en los anexos las variables empleadas, los instrumentos utilizados y un glosario de los términos relevantes. Al final en el apartado de las referencias se realiza un recuento de las fuentes consultadas para la elaboración del presente documento.

Objetivo general

Diseñar y construir un evaporador que funcione a base de energía solar térmica para obtención de miel de agave.

Objetivos específicos

- Conocer el proceso general de producción de la miel de agave.
- Proponer un producción sustentable del miel de agave empleando energía solar térmica
- Diseñar el evaporador solar para miel de agave
- Realizar la construcción del prototipo y verificar su funcionamiento

Justificación

Para el presente proyecto se pretende diseñar y construir un evaporador en donde la energía que se utilice para evaporar la miel del agave provenga de un sistema solar-térmico, sustituyendo a las anteriores fuentes empleadas para ese fin; biomasa o gas LP.

El empleo de biomasa para la obtención de energía ha ocurrido desde tiempos remotos. Sin embargo el uso desmedido de algunos tipos de biomasa, como la leña, ha propiciado la deforestación de una muy amplia extensión de selvas y bosques. En los últimos 50 años la humanidad ha cambiado los ecosistemas más rápida y extensivamente que en cualquier periodo comparable de la historia. Muchos de estos cambios han sido en respuesta a las necesidades crecientes de comida y agua, así como de madera, fibras y combustibles. El uso desmesurado de estos recursos tiene consecuencias graves, como la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y la degradación de los suelos. (Boquera, 2016)

Por otra parte el empleo de combustibles fósiles como fuentes de energía ha generado un incremento desmesurado de GEI (gases de efecto invernadero). Dentro del panel intergubernamental de las naciones unidas para el cambio climático se menciona que “se debe realizar un cambio de paradigma, el desarrollo de las economías no puede seguir alimentándose de energía sucia que no sólo contamina y agudiza los cambios en el clima, sino que hace cada vez más dependientes y vulnerables a los países de la región quienes por alcanzar favorables divisas mueven sus economías con energéticos fósiles, olvidando el bienestar de la población a nivel mundial y su calidad de vida. (IPCC, 2014)

Es un enorme reto sustituir al petróleo y sus derivados: una fuente de energía con alta capacidad calorífica, de fácil transportación, con un enorme desarrollo tecnológico y logístico y además de bajo costo, pero que incrementa de forma desmedida la cantidad de gases de efecto invernadero, en especial el anhídrido carbónico (CO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x).

El uso y aprovechamiento de las energías renovables es indudablemente la alternativa de la que debemos echar mano para enfrentar la contaminación atmosférica y el cambio climático, algunas de las energías renovables como: eólica, solar (térmico y fotovoltaico), de biocombustibles, hidrógeno y mareomotriz o una mezcla de ellas en sistemas híbridos debe ser empleada.

El agave mexicano (*agave silviana*) crece en varios estados de la república generalmente en terrenos áridos y agrestes en donde otros tipos de cultivo no son viables. En el pasado su explotación para obtener fibras y pulque generó un incremento en su cultivo y una importante fuente de ocupación en las regiones productoras. La aparición de fibras plásticas y la publicidad a numerosas bebidas alcohólicas trajo consigo un desplome en su procesamiento. A partir del aguamiel puede obtenerse un concentrado conocido como miel de agave o miel de maguey. Este concentrado no requiere la adición de conservadores debido a su alto contenido de azúcar. Es empleado como edulcorante natural. Para su procesamiento se emplea comúnmente leña o gas LP.

El consumo de energía para elevar la temperatura de un fluido a evaporar a partir de la combustión de biomasa, por una resistencia eléctrica o por combustión de gas natural, genera un elevado consumo de combustible o de energía, según sea el caso, las consecuencias; un alto costo económico además de grandes problemas de la contaminación ambiental. Se propone el uso de energía renovable, en este caso de energía solar térmica, que para este fin supera al sistema fotovoltaico, eólico o geotérmico pues no se requiere una transformación energética. Implica un proceso de transferencia de calor desde el material caloportador hasta el material a evaporar. Una alternativa, que permita reducir la dependencia energética, además de reducir los efectos ambientales, generados por los sistemas de combustión empleados actualmente.

Las ventajas de obtener un material con menor contenido de agua son principalmente mejorar la conservación del producto, permitir un ahorro energético en operaciones subsecuentes como deshidratación o congelación, reducir los gastos de almacenamiento, transporte y material de empaque, facilitar el uso del producto al consumidor o en la industria.

Hipótesis de trabajo

Con la realización del presente proyecto se pretende demostrar la tesis, sobre que la producción de miel de agave utilizando energía solar como fuente de energía, es un proceso viable y sustentable.

Metodología

Se trata de una investigación de corte cuantitativo que ha tomado el método experimental como base metodológica. La investigación se ha realizado desde enero de 2016 hasta febrero de 2018. Para la obtención de información se han consultado diversas fuentes bibliográficas y en internet. La base de datos de la dirección general de bibliotecas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha sido el sitio de acceso a la mayor parte de los artículos consultados.

Una parte de la investigación se ha hecho en el municipio de Contepec, Michoacán. Ha sido lo relativo a cuantificación del recurso solar y a obtención de aguamiel. Una segunda parte de la investigación fue llevada a cabo en la Ciudad de México. En las instalaciones del Siladin (sistema de laboratorios para el diseño y la investigación) del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) plantel Vallejo de la UNAM. El destilador solar fue colocado en la azotea de dicho edificio.

El registro de la información ha sido en dos medios escritos, una libreta de apuntes y hojas de registro. El almacenamiento por su parte se ha realizado en memoria USB además de la memoria de la computadora personal. El diseño del prototipo se realizó tomando como base el destilador solar de tubo con concentrador acoplado a un destilador de pirámide construido por investigadores hindúes en 2015. Para armar el destilador se requirieron servicios de soldadura, torno, carpintería y soplado de vidrio. La construcción del prototipo fue realizada por el sustentante.

Para la cuantificación de las variables se ha hecho uso de diversos instrumentos de medición entre los que destacan el piranómetro y los termómetros. Algunas determinaciones han sido comparadas con los datos obtenidos por el PEMBU.

En lo que respecta a resultados se muestran una serie de imágenes, además, se han construido varias tablas y gráficos que permiten realizar el análisis. Con base a ello se han generado algunas conclusiones y se anotan sugerencias para un trabajo futuro.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 La planta de Maguey

El maguey pulquero (*agave salviana*) es una planta que se reproduce en el altiplano mexicano, su cultivo y aprovechamiento se remonta a la época prehispánica. Se adapta a condiciones climáticas difíciles y proporciona una variedad de productos. En el centro de México los magueyes florecen a una altura entre 1200 y 2500 metros sobre el nivel del mar. Se reproduce en las regiones con lluvias de 350 - 1000 mm anuales en tierras frías y semiáridas. (Narváez-Suárez, 2016) Los principales estados donde se le cultiva son Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Querétaro y el Estado de México. El maguey tarda de 7 a 8 años en alcanzar la madurez de producción y tiene una vida útil de 10 a 12 meses. Resiste con éxito la sequía y crece en terrenos accidentados y poco fértiles que difícilmente pueden ser empleados para el cultivo de otras especies vegetales como el frijol o maíz.

1.2 producción de aguamiel

Del agave se obtiene aguamiel, un jugo dulce, producto del raspado diario del tronco o calabazo de la planta. Con el aguamiel y mediante un proceso de fermentación se obtiene la tradicional bebida mexicana conocida como Pulque. En las últimas décadas, se ha observado una disminución en el cultivo del agave y por tanto de la bebida fermentada. Lo anterior a consecuencia de una acelerada transculturación. Además de la producción de pulque, el aguamiel puede emplearse para la producción de miel de agave, producto alimenticio generalmente empleado como edulcorante.

El proceso de producción de miel de agave puede darse a lo largo del año. Sin embargo se establece entre los meses de noviembre hasta abril para evitar que la

lluvia diluya el aguamiel. De lo contrario el gasto energético para evaporarla se eleva considerablemente. La temperatura de operación no debe de ser mayor a 80 grados, así, sustancias como las vitaminas no serán degradadas. La obtención de miel de agave se da mediante una evaporación de la mayor parte del agua contenida en el aguamiel. A partir de cada 10 litros de aguamiel en promedio se obtiene un litro de miel de agave. El proceso completo de elaboración incluye las siguientes etapas: Filtración, cocción, filtración, evaporación, enfriamiento y envasado. En las etapas de cocción y evaporación se emplea como fuente de energía a la biomasa (leña) y en algunas ocasiones se emplea gas L.P. En el caso del empleo de biomasa, se debe básicamente a lo accesible del recurso, en donde solo basta recolectarla. Lo anterior tiene como resultado el deterioro al ambiente por la tala de árboles para obtener leña de ellos. Y por la generación de dióxido de carbono producto de la combustión. De igual manera se generan contaminantes al emplear gas Lp.

1.2.1 Composición química

La miel de agave está constituida por diversos compuestos orgánicos entre los que destacan los carbohidratos naturalmente. En la tabla 1 puede observarse la composición química del aguamiel, dicha composición puede variar, dependiendo de las condiciones de cultivo del agave. (Muñiz-Márquez, 2015)

Tabla 1 Composición fisicoquímica del jarabe de Agave. Tomada de Muñiz-Márquez, 2015

Contenido	Suero no estéril	Suero estéril
Total de Azúcares (gL^{-1})	102.88 ± 2.66^a	108.64 ± 7.78^a
Azúcares Reducidas (gL^{-1})	32.33 ± 2.38^b	47.25 ± 3.40^a
Proteína (gL^{-1})	0.14 ± 0.00^a	0.17 ± 0.04^a
Lípidos (gL^{-1})	18.58 ± 0.00^a	15.31 ± 0.99^a
Cenizas (gL^{-1})	8.17 ± 1.37^a	6.97 ± 2.13^a
Total de sólidos (gL^{-1})	176.33 ± 2.70^a	170.48 ± 2.70^a
Humedad (gL^{-1})	82.36 ± 0.55^a	83.14 ± 0.55^a
Grados brix (gL^{-1})	10.60 ± 0.10^a	9.67 ± 0.06^a
Densidad (gL^{-1})	1.05 ± 0.00^a	1.04 ± 0.00^a

a y b : valores de desviación estándar

La caracterización de los compuestos presentes en aguamiel mediante métodos estandarizados, ayudaron a conocer el efecto potencial de éste en la salud como alimento funcional o ingrediente alimentario.

El aguamiel tuvo 89.61% de humedad, 3.50% de proteína, 3.10% de cenizas, 61.31% azúcares reductores totales, de los cuales 32.63% es fructosa y 28.68% glucosa, mientras que el contenido de fructooligosacaridos fue 15.51%. El aguamiel contiene una mayor proporción de minerales como potasio, calcio y sodio, seguidos de hierro, cobre, magnesio, selenio y zinc. Se determinó el contenido de vitaminas hidrosolubles que incluyen el complejo B (B1, B2, B3 y B6) y ácido ascórbico. Se encontró un contenido de saponinas de 1.17 g/100 g muestra, las cuales tienen actividad anti-inflamatoria. En el aguamiel se encontraron además un total de nueve aminoácidos esenciales y ocho no esenciales, de los 20 necesarios para la salud. Una característica adicional fue el contenido de compuestos fenólicos, los cuales exhiben actividad antioxidante. El grado de polimerización de los fructooligosacaridos fue de 5-10. (Mielenz, 2015)

1.2.2 Recolección

En el municipio de Contepec, Michoacán el agave se ha cultivado históricamente. Se genera empleo para las personas de la localidad en actividades como siembra, barbecho y limpieza del agave. Además de la recolección de aguamiel para su venta o para su fermentación alcohólica para producir pulque.

La recolección de aguamiel se hace con un instrumento cónico llamado acocote. Por succión se llena con el líquido (aguamiel) que se almacena en el calabazo del maguey. Cada planta de agave puede producir cerca de 2 litros. Los recipientes que se emplean para traslado son de 20 litros de tal forma que pueden acarrear por una persona o bien por animales de carga.

1.3 El sol como fuente de energía.

El sol es la estrella más importante para el desarrollo de la vida en el planeta. Nos proporciona calor, luz y otras radiaciones. Todo lo anterior es imprescindible para la vida en la tierra. La energía solar es producto de reacciones de fusión nuclear donde los átomos de hidrógeno se transforman en átomos de helio con la consecuente liberación de energía. Dicho proceso es lo que mantiene la fotosfera solar a una temperatura cercana a los 6000 grados.

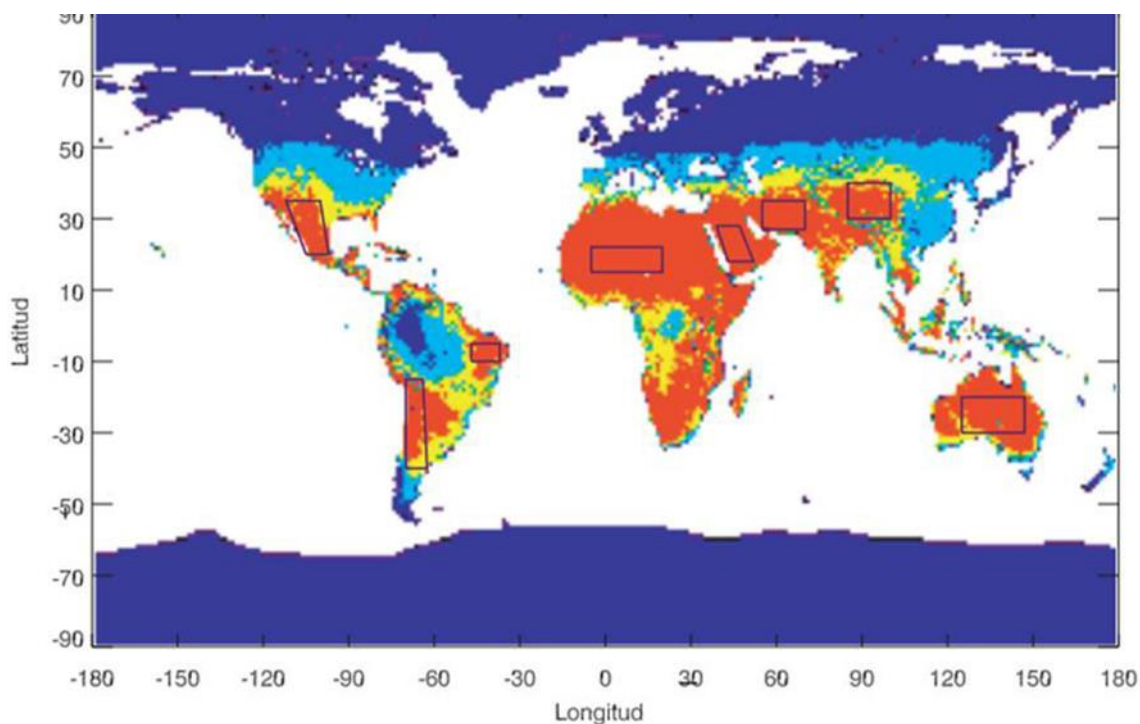
La cantidad de energía solar que llega a la tierra tiene variaciones debido a múltiples fenómenos como el ciclo solar, la rotación diferencial del sol, las manchas y explosiones solares. Sin embargo se ha estimado un valor para la llamada constante solar de 1353 W/m^2 . (Duffie, 2013). Ese parámetro se define como la cantidad de energía solar por unidad de tiempo y unidad de área, sobre una superficie perpendicular fuera de la atmósfera. Los fenómenos climatológicos sobretodo vientos y nubosidad, evitan que sobre la superficie terrestre, incida de manera constante la radiación solar. Por ello puede describirse como difusa o directa.

La mayoría de los energéticos usados tienen como base la energía solar. La producción de biomasa se debe a la fotosíntesis al igual que los combustibles fósiles. Un animal de carga o un vehículo a gasolina utilizan entonces de manera indirecta la energía solar. El caso de la energía eólica e hidráulica tiene su origen en la radiación solar que provoca diferencias de temperatura en los gases que constituyen la atmosfera.

El Sol puede ser la fuente energética práctica y abundante de la que dependa la civilización el día en que disminuyan considerablemente los combustibles fósiles.

1.3.1 Irradiación solar en México

México posee un potencial considerable de generación de energía a partir de fuentes renovables, tanto por su extensión territorial de casi 2 millones de kilómetros cuadrados, como por su ubicación geográfica comprendida entre las latitudes norte de $32^\circ 43'$ y $14^\circ 32'$. Al Oeste y al Este, el país está limitado por



Color	Grado	Potencia (día) MJ m ⁻²	Potencia (Anual) MJ m ⁻²
Rojo	Muy Alto	20	7300
Amarillo	Alto	18-20	6500- 7300
Agua	Regular	14-18	5100 - 6500
Azul	Bajo	< 14	< 5100

Figura 2 Niveles de energía solar sobre la superficie de la tierra (Quanhua, 2009)

En la figura 2 puede apreciarse también el gran potencial que tiene México en recurso solar en comparación con otras latitudes. En rojo se muestra la mayor parte del territorio lo que corresponde a unos 20 MJ por cada metro cuadrado del territorio.

1.3.2 Uso de la energía solar térmica

El Sol es una fuente de energía capaz de satisfacer indefinidamente a muchas de nuestras necesidades energéticas, de hecho a todas, si pudiéramos o supiéramos

adaptar nuestras necesidades a los recursos disponibles. La energía solar-térmica es el uso de la energía radiante del sol para producir energía calorífica.

La energía solar-térmica es usada para calefacción de agua e incluso producción de vapor. El uso de los calentadores solares domésticos es una de estas aplicaciones.

La historia de los calentadores solares se remonta a la construcción de las llamadas cajas calientes. En 1767 Horace De Saussure construyó una pequeña caja rectangular de madera de pino de un centímetro y medio de espesor, revestida por dentro de corcho negro. La parte superior de la caja quedaba cerrada por tres láminas separadas de vidrio. Expuesta la caja al sol, el interior de su base alcanzaba una temperatura de 118 grados. A este dispositivo se le denominaría posteriormente caja caliente, por la gran cantidad de calor solar que podía retener. Para 1891 Clarence Kemp, en Baltimore, patenta un calentador solar que llamó Climax. Las declaraciones de los usuarios, dejando testimonio de que incluso en días nublados "era sorprendente lo mucho que se calentaba". Posteriormente en 1908, William Bailey construyó y patentó otro dispositivo de calentamiento de agua con energía solar al que llamo calentador de agua "día y noche" que ya incorpora un depósito de acumulación de agua mediante un termosifón. (Benedicto, 2014)

Muchos diseños de calentadores solares se han realizado en el siglo posterior, utilizando muy variados materiales y diseños. Los concentradores solares también se pueden utilizar para producir agua dulce a partir de agua salada o para descontaminarla resolviendo la necesidad de obtener agua limpia. Puede utilizarse para cocinar alimentos mediante estufas solares y evitar la destrucción de bosques y ecosistemas. Además de disminuir la producción de dióxido de carbono, principal gas responsable del efecto invernadero.

1.4 Concentrador parabólico compuesto (CPC)

Cuando la energía del sol es concentrada por superficies reflejantes, la densidad energética se incrementa. Lo anterior permite alcanzar temperaturas elevadas con solo captar el calor solar. Los sistemas de concentración solar que operan actualmente pueden obtener vapor de agua a muy altas temperaturas (alrededor de 600 °C) como en el caso de los sistemas de torre central, los sistemas de canal parabólico o de disco Stirling. Esta energía puede utilizarse para procesos industriales, para calentar fluidos a muy alta temperatura, para producir electricidad en plantas termoeléctricas solares o directamente en máquinas térmicas.

Dentro del ámbito de las tecnologías de concentración solar, el concentrador parabólico compuesto (CPC) es uno de los dispositivos más usados, sobre todo por su gran capacidad en concentración de energía.

La idea del CPC tiene un poco más de 50 años, fue concebido simultáneamente en 1966 en Estados Unidos de Norteamérica por Hinterberger y Winston, en Alemania en 1966 por Ploke, y en la URSS por Baranov y Melnikov.

En 1974 Winston describió el CPC en 2D, mostrando las ventajas de este tipo de concentrador, como un concentrador de no imagen, para ser usado en dispositivos solares y también mostró que el CPC tiene la máxima concentración posible.

En 1976 Rabl analizó las propiedades ópticas y térmicas del CPC. Aunque la energía proporcionada por el Sol es abundante en cuanto a espacio irradiado, en muchas zonas de nuestro planeta, sin embargo, nos llega al nivel de la tierra en muy baja densidad (en México la irradiancia solar promedio es del orden de $E_s \approx 850 \text{ W/m}^2$); debido a esto las aplicaciones de la energía solar que se pueden lograr sin concentrar la irradiancia solar son muy pocas. El uso de concentradores solares nos brinda la oportunidad de aplicar la energía solar en diversas tecnologías. Los concentradores de no imagen (entre los que se encuentra el CPC), tienen la gran virtud de lograr la concentración de energía solar sin el uso de un sistema de seguimiento, disminuyen el costo del sistema de concentración

de energía solar, lo cual hace muy atractivos a estos equipos en diversas aplicaciones solares.

En el caso de los concentradores tipo CPC, se pueden lograr concentraciones entre $1.1 \leq C \leq 45\ 300$, al ajustar en el diseño el ángulo de apertura. (Tapia, 2009)

Capítulo II

Estudio de caso

El proyecto de producción de miel de agave, empleando energía solar, se plantea desarrollar en el municipio de Contepec en el estado de Michoacán.

2.1 Características del sitio

Breve reseña histórica.

En tiempos prehistóricos, la comarca de Contepec formaba parte de un conjunto de pantanos que se extendía desde el Valle de México hasta la Ciénega de Chapala, habitados por fauna hoy extinguida. Durante la guerra de independencia, las fincas rústicas más representativas de la región fueron destruidas. En octubre de 1810, la hacienda de Tepetongo fue materialmente desmantelada por el ejército insurgente que se dirigía a la Ciudad de México. Años más tarde, las tropas al mando de los hermanos López Rayón, confiscaron en repetidas ocasiones los productos de la hacienda de Tepuxtepec. En la primera mitad del siglo XIX, Contepec perteneció al estado de Guanajuato y estuvo sujeto al municipio de Coroneo. En 1857, al promulgarse la Constitución, hubo modificaciones territoriales y Contepec se incorporó al estado de Michoacán, dentro del partido de Tlalpujahuá. En la época porfirista, las haciendas del lugar, se caracterizaron por ser de las más importantes productoras de trigo. La hacienda de Tepuxtepec, propiedad de la familia Sánchez Teruel, fue un sólido emporio agrícola, gracias a las obras hechas en los márgenes del río Lerma. Al estallar la revolución, los habitantes de Contepec, encabezados por Ladislao Rivera, se adhirieron a la causa maderista. Rivera derrotó a mediados de 1915, a las fuerzas comandadas por Benjamín Argumedo, en territorio del Estado de México. Al instaurarse la Reforma Agraria, Contepec y el barrio de Santa María la Loma, fueron las primeras agrupaciones campesinas que exigieron la restitución o dotación de tierras. La efervescencia social, producto del movimiento agrarista, dio lugar a un incidente violento, en el que perdió la vida un maestro dirigente de la

Liga Anticlerical de Contepec, lo que obligó al Gobierno del Estado, a trasladar la cabecera municipal a Tepuxtepec, en julio de 1935. Tres años más tarde, se devolvió al pueblo de Contepec, la categoría de sede municipal.

Aspectos socioeconómicos

Contepec es una población rural, en la cabecera municipal tiene unos 15 000 habitantes, del total que son 32,954, tiene 2 escuelas primarias, 2 secundarias y un colegio de bachilleres. No cuenta con salas de cine ni de teatro, tiene un solo mercado y una iglesia. Las principales actividades económicas son el cultivo de maíz, la cría de cerdos y de ganado ovino. Generalmente a escala doméstica. La situación ambiental es delicada como en la mayoría de los poblados de nuestro país, por la sobreexplotación de bosques. En Contepec mucha gente utiliza leña como fuente de energía, generalmente para uso en la preparación de alimentos. Es por eso que el deterioro del cerro Altamirano ya es considerable, un indicador es la fauna, las mariposas monarca llegaron aun en el año 2007. Ya no se asientan en ese bosque por la devastación al oyamel (árbol que les da alojamiento), los últimos venados fueron cazados en la década de los ochentas y el último oso pardo en 1904. (Inafed, 2017)

Extensión

Su superficie es de 380.74 km² y representa el 0.68 por ciento de la superficie del Estado.

Orografía

Su relieve lo constituyen las estribaciones septentrionales del sistema volcánico transversal y la depresión del Lerma; y los cerros Altamirano, Prieto, Zorrillo, Cerco, Gamboa, Alto y Borrego.

Hidrografía

Su hidrografía se constituye por los ríos Lerma, Talpujahuá y presa Tepuxtepec.

Flora y fauna.

En el municipio domina el bosque mixto, con pino y encino; y la pradera, con huisache, nopal y matorrales diversos. Su fauna la conforman ardilla, zorrillo, comadreja, tlacuache, coyote, cacomixtle y aves como pato, paloma torcaz, gallina montés y especies de pez, como la carpa. La superficie de maderables es ocupada por el pino y encino, y en el caso de la no maderable, por arbustos de distintas especies.

Tipos de suelo

Los suelos del municipio datan de los periodos cenozoico y cuaternario, corresponden principalmente a los del tipo podzólico y gleysol. Su uso es primordialmente agrícola y en menor proporción ganadera y forestal.

Clima

Su clima es templado con lluvias en verano, tiene una precipitación pluvial de 1,168.0 milímetros y temperaturas que oscilan de 8.6 a 22.4° centígrados. Los vientos dominantes son los del noroeste debido a la presencia de un cerro denominado Altamirano de 2600 m de altitud, con velocidades medias de entre 25 y 40 km /h (Inafed, 2017)

2.2 Localización

En los siguientes planos se muestra la ubicación del municipio de Contepec. En la figura 3, se pueden apreciar los límites con los estados de Querétaro, Guanajuato y Estado de México. En la figura 4 se muestra la conformación del municipio de Contepec y en la figura 5 puede observarse una la imagen satelital del mismo. (Google LLC, 2015)



Figura 3 . Mapa de localización del municipio de Contepec, Mich.



Figura 4 . Plano del municipio de Contepec

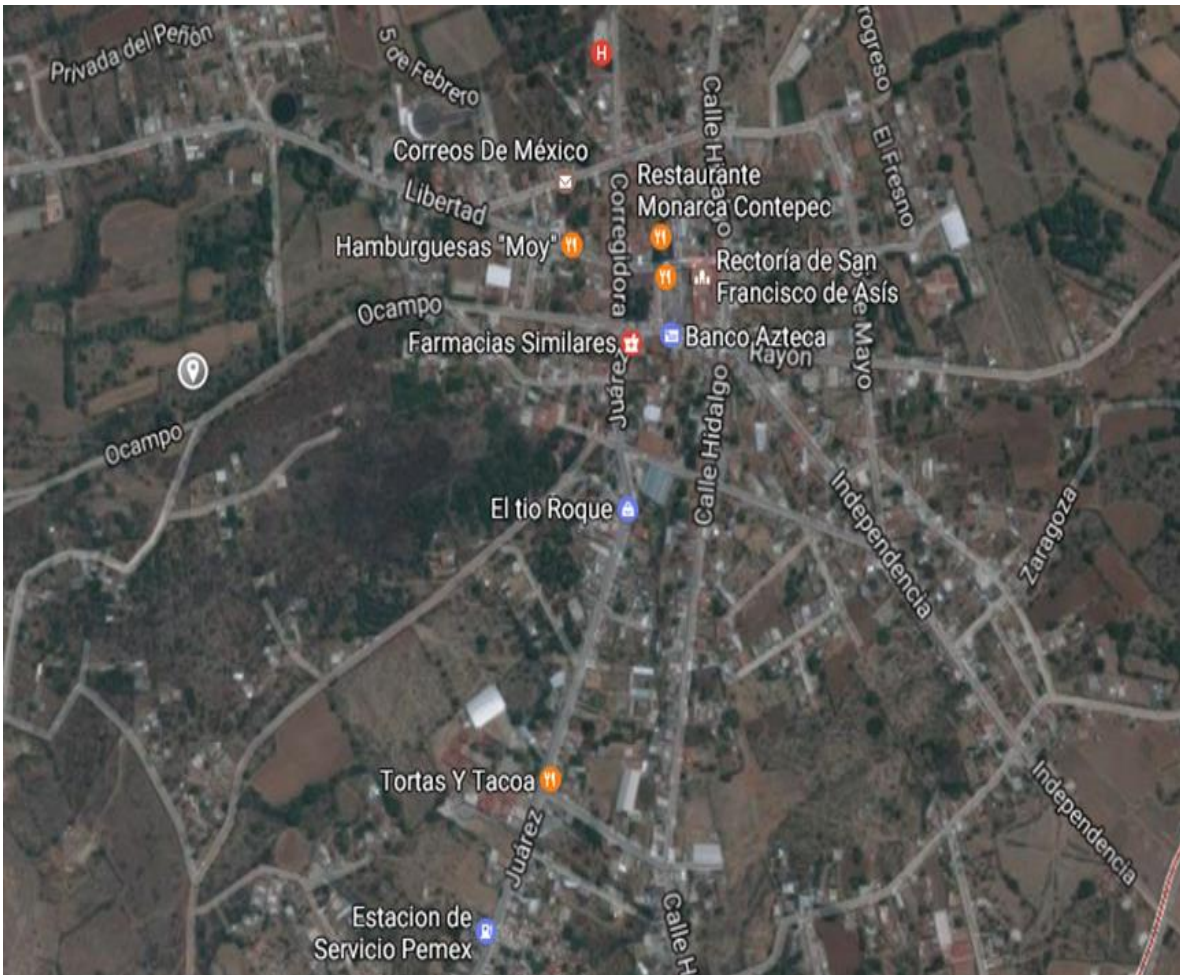


Figura 5. Plano del poblado de Contepec

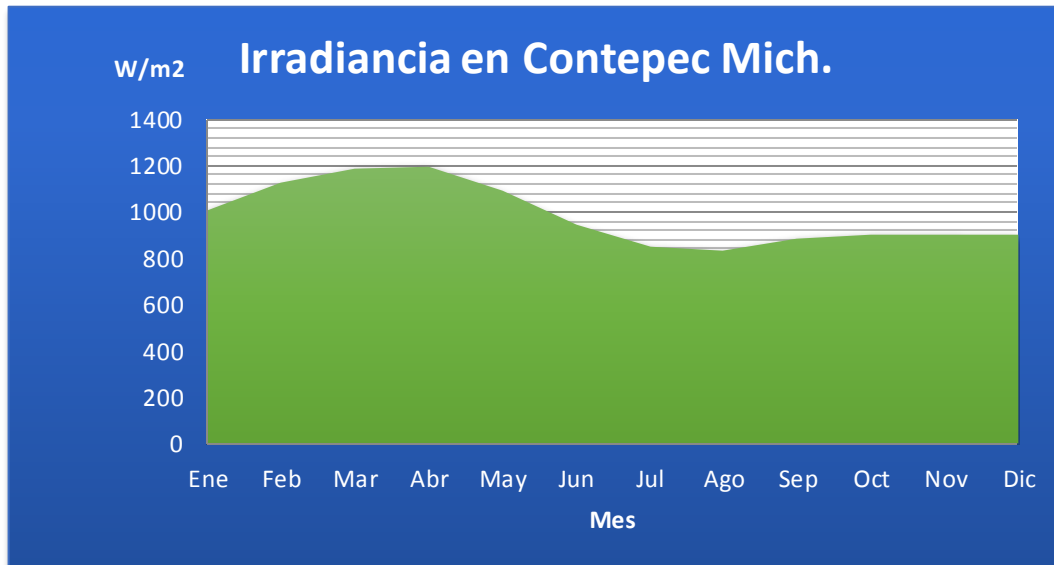
2.3 Recurso solar en Contepec Mich.

En el municipio de Contepec en el poniente del estado de Michoacán se tiene el recurso solar de forma por demás abundante, durante muchos de los meses del año. Las excepciones son los meses cuando llueve, por la presencia de nubosidad generalmente de junio a septiembre, lo anterior puede verse en los datos de la tabla 2, obtenidos de Earth Observing System Data and Information System ,2016.

Tabla 2 Irradiación en Contepec, Michoacán. Con datos de la [NASA](#)

Mes	Irradiancia (W/m ²)
Enero	1008
Febrero	1122
Marzo	1188
Abril	1196
Mayo	1086
Junio	940
Julio	850
Agosto	832
Septiembre	884
Octubre	902
Noviembre	902
Diciembre	900
Media anual	982

En la gráfica 1 se observa la cantidad de energía por metro cuadrado que recibe del sol este lugar. Se puede apreciar que el recurso solar es muy abundante de febrero a junio y constante de octubre a enero.



Gráfica 1 Irradiación en Municipio de Contepec. Elaboración propia con datos de NASA

2.4 Producción de miel de agave

La producción de miel de agave se ha realizado históricamente en los estados en donde ha sido común el cultivo de maguey pulquero (*A. silviana* y otras variedades) aunado a la búsqueda de diversificar los productos obtenidos a partir del cultivo del maguey. Una parte importante de la producción se realiza a pequeña escala, como se muestra en la tabla 3, y se comercializa a través de distribuidoras. (inegi.gob, 1 980)

Tabla 3 Productores de miel de maguey en México, tomada de Hernández, 2006.

No.	Empresa / Organización	Representante	Municipio
HIDALGO			
1	Artesanías y Productoras de Miel de Maguey	Alberta Genoveva Ramírez Pérez	Cardonal
2	Elaboración de miel de maguey	Saúl Resendiz Bolaños	Chapantongo
3	Producción de miel de maguey	Alejandro Sánchez Rivas	Huichapan
4	Producción de miel de maguey (Hidromiel)	Daniel Contreras Ángeles	Tomacuxtla
5	Elaboración de alimentos a partir de los recursos del clima semiárido: miel de maguey	Ilya Romero Garibay Jesús Flores Merino	Nopala
JALISCO			
6	Nekutli, S.A. de C.V.	Manuel Cruz González	Guadalajara
MICHOACÁN			
7	Jesús Ignacio Simón Zamora	Jesús Ignacio Simón Zamora	Uruapan
8	Productores Naturales "San Miguel"	Vicente Geerts Rasquin	Erongaricuaró
9	Productores de Nopal y miel de maguey	Juan González Ramírez	Seguio
MORELOS			
10	Grupo Megayel	Mercedes Victoria Reyes	Huitzilac
ZACATECAS			
11	Aprovechamiento Integral del maguey	José Luis Medina	Villa Hidalgo

El consumo en la república mexicana es muy limitado y no existen datos confiables acerca de su consumo y comercialización, sin embargo para el comercio en el extranjero, cuyo listado se observa en la figura 6, Bancomext tiene registrada información referente a los países, que a lo largo de los años han importado miel de maguey.

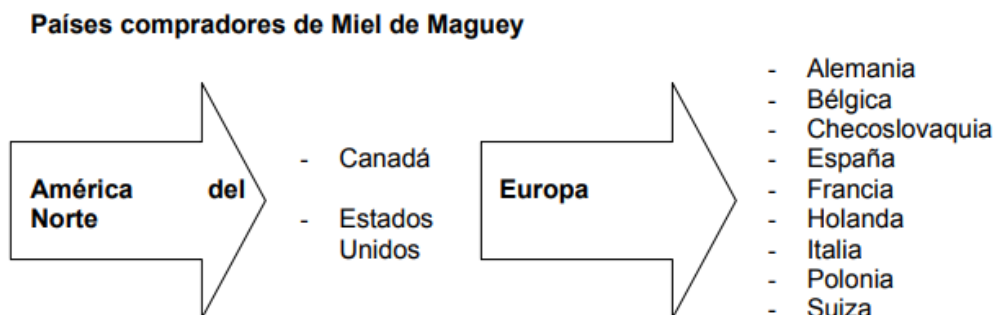


Figura 6 Exportación de miel de maguey, tomada de Hernández F. 2006

En lo que respecta al precio en México se ven precios que van de los 100 hasta los 180 pesos por litro de miel de maguey. En el caso de la exportación los precios en dólares se presentan en la figura 7.

Granel	Producto envasado en botellas de 250 ml.
1.82 dólares/ kg	2.30 dólares

Figura 7 Precio internacional de la miel de agave, tomado de Hernández F. 2006

2.4.1 Proceso actual de producción de miel de agave

A lo largo de los años y actualmente la cantidad de aguamiel que se destina a la producción de miel de agave es mínima, alrededor del 1%, de la empleada para fermentarse, con el fin de obtener pulque. Unos 5750 litros/día en el distrito de

Zitácuaro, que comprende las zonas productoras: Maravatío, Epitacio Huerta, Senguio y Contepec (Inafed, 2017)

El aguamiel, fruto de la raspa del maguey, es recolectada para la elaboración de miel de agave, durante los meses de noviembre a mayo en tres horarios: 6 am, 12 pm y 18 pm, con el propósito de evitar la fermentación natural. El aguamiel es filtrado para eliminar restos de “raspa” o corteza del maguey y se coloca en el recipiente que se lleva al fuego, para iniciar el proceso de evaporación, de donde se obtendrá un litro de miel de agave por cada 8.5-10 litros de aguamiel. La energía requerida para el proceso de evaporación es aportada por biomasa, leña obtenida de arbustos, árboles o de pencas de maguey, la cantidad de biomasa empleada depende del tipo de biomasa, de la eficiencia de la combustión y del tipo de recipiente empleado que puede ser barro, aluminio, peltre, etc. En algunos casos se emplea gas LP en sustitución de la biomasa. La miel de agave elaborada se coloca en recipientes, donde puede almacenarse por largo tiempo, ya que su alta concentración de azúcares, evita que se fermente, además de que el proceso de evaporación es también un proceso de pasteurización para la miel de agave.

2.4.2 Proceso de producción empleando energía solar

La alternativa que se plantea para producir la miel de agave es sustituir el tipo de fuente de energía empleada, biomasa o gas LP, por energía solar térmica. El proceso de recolección se mantendrá igual en lo que respecta a la temporada y los horarios. La energía requerida para la evaporación será aportada por la energía solar térmica, sin embargo se tendrá al gas LP como fuente auxiliar de energía en lo que respecta a días nublados y para pasteurizar el aguamiel recolectado por la tarde. Se contempla que el evaporador solar opere en las horas del día donde es mayor la irradiancia.

2.4.3 Subproductos

Respecto a los subproductos, generados a lo largo tanto del cultivo del agave como durante el proceso, se considera emplearlos para la obtención de energía y etanol. En la figura 8 podemos observar, que tanto de las pencas del agave como del tronco y raíces se obtendrá biomasa, que puede utilizarse como fuente de energía.

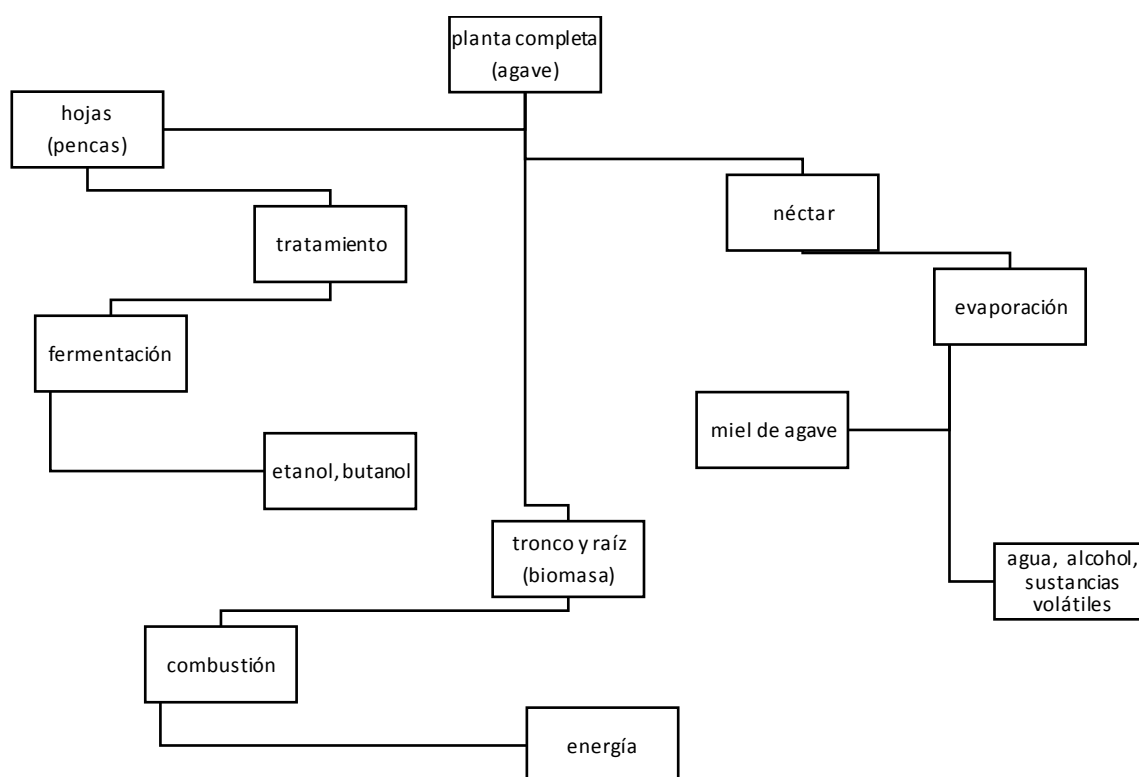


Figura 8. Proceso de producción de miel de agave y generación de subproductos. Elaboración propia

2.5 Destiladores solares

El destilador solar es un dispositivo que emplea la energía contenida en la radiación solar para aumentar la temperatura de una mezcla líquida, permitiendo que alguno o algunos de los componentes alcancen el cambio de fase líquido-gas para luego condensarlos y separarlos de la mezcla inicial.

La destilación solar es uno de los métodos más fáciles y antiguos para obtener agua pura a partir de agua insalubre o agua de mar. Los desalinizadores no son nuevos. Aristóteles en el siglo IV AC mencionó un método para evaporar agua del mar y producir agua potable. En 1589 Della Porta utilizó destilación solar para producir agua con olor de varias hierbas, a nivel doméstico. Desalinizadores grandes fueron construidos en Chile en 1872 con un área de 4700 metros cuadrados. Producían 6000 galones de agua por día para proveer de agua potable a un campamento de las minas de nitratos en el desierto de Atacama. (IPCC, 2014)

2.5.1 Principales tipos de destiladores solares

A lo largo de los años se han construido un gran número de destiladores solares, aunque si bien el principio es el mismo, es decir, calentar a un fluido con la energía solar, emplear el efecto invernadero generado dentro del sistema y condensar la fracción que pasó a la fase gaseosa. Lo que cambia en todo caso es la forma de la cubierta, la forma del colector, los materiales empleados, etc.

Los destiladores solares pueden ser clasificados en dos categorías destiladores solares activos y destiladores solares pasivos, dependiendo de la forma de aprovechamiento de la energía solar. Los destiladores solares activos pueden emplear colectores térmicos, paneles fotovoltaicos o concentradores junto con las unidades de destilación. En tanto los destiladores solares pasivos usan la radiación solar en forma directa en el proceso de destilación, son simples al construirlos y operarlos además generalmente tienen un tamaño pequeño y bajo costo. (Kumar, 2015)

A lo largo de los años se han propuesto una gran cantidad de combinaciones de destiladores solares activos y pasivos, algunos de los más importantes se enlistan en la tabla 4, en muchos de ellos se han realizado combinaciones de; tipos de colectores, geometrías para las coberturas, distintos materiales, o empleando paneles fotovoltaicos y concentradores diversos con el objetivo de aumentar la cantidad de destilado obtenido.

Tabla 4. Principales tipos de destiladores solares pasivos. Elaboración propia

Evaporador solar	Forma del colector	Tipo de cubierta
Esférico	esférico, plano, cóncavo	Esférica
Piramidal	plano, cóncavo	Piramidal
Hemisférico		Hiperbólica
Tubular	plano, cilíndrico	Cilíndrica
Trapezoidal	plano, plano inclinado, cóncavo	plano inclinado
Escalonado	Escalonado	
En cascada	en cascada	
Tipo mecha (wick type)	plano inclinado	
Doble charola (doublé basin)		
Tipo V	plano, cóncavo	En forma de v
Triangular		Triangular
Recipiente esférico (spherical basin)	esférico	Piramidal, cilíndrica, plano inclinado

Las siguientes imágenes mostradas de la figura 9 a la 16 corresponden a los destiladores solares más empleados.

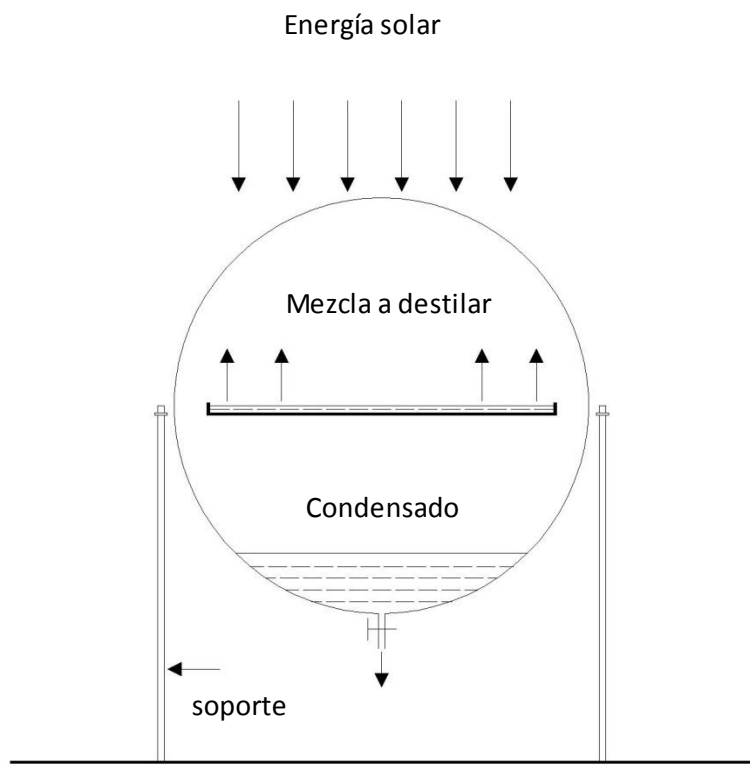


Figura 9 Destilador solar esférico

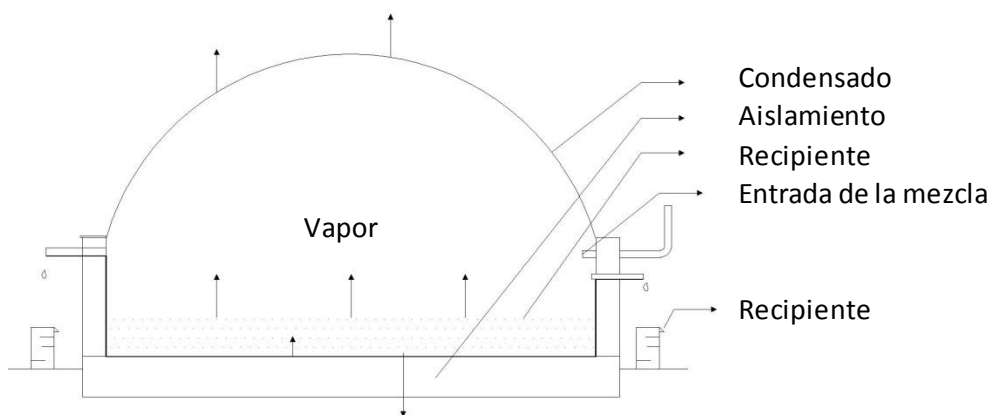


Figura 10 Destilador solar hemisférico

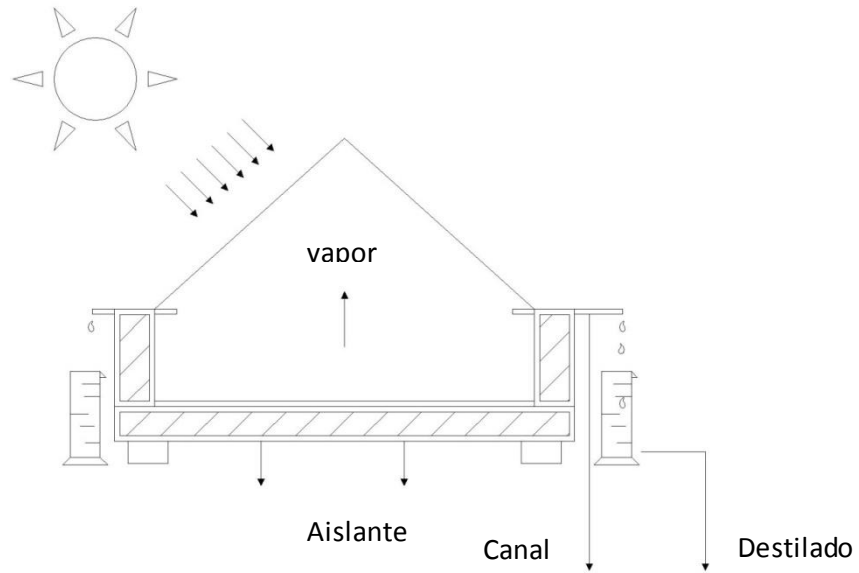


Figura 11 Destilador solar de pirámide

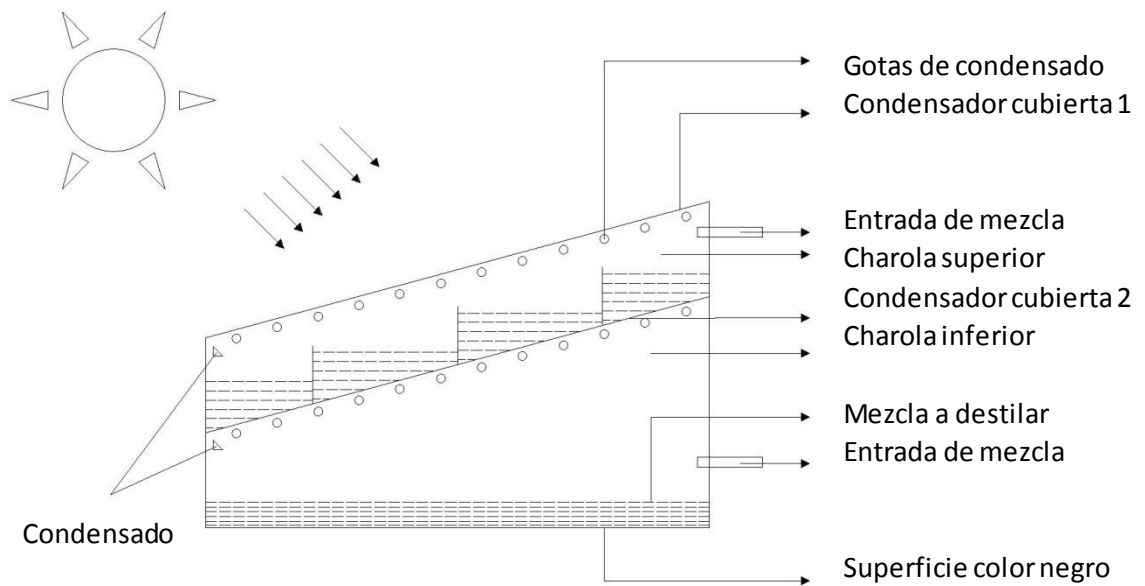


Figura 12 Destilador solar de doble piso

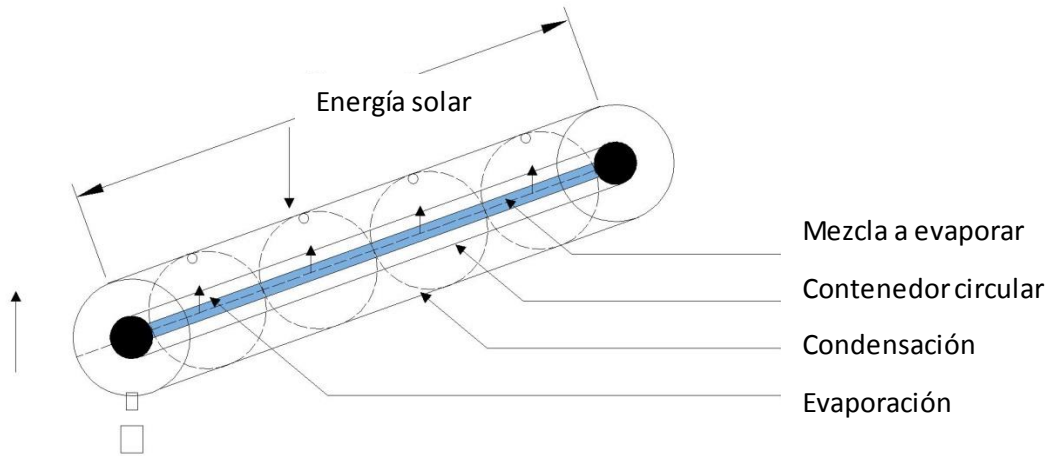


Figura 13 Destilador solar tubular

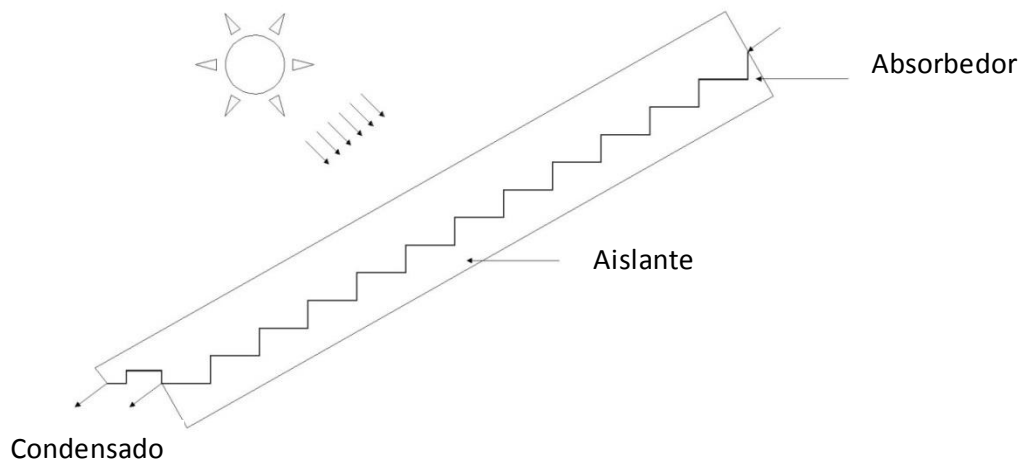


Figura 14 Destilador solar de tipo escalera

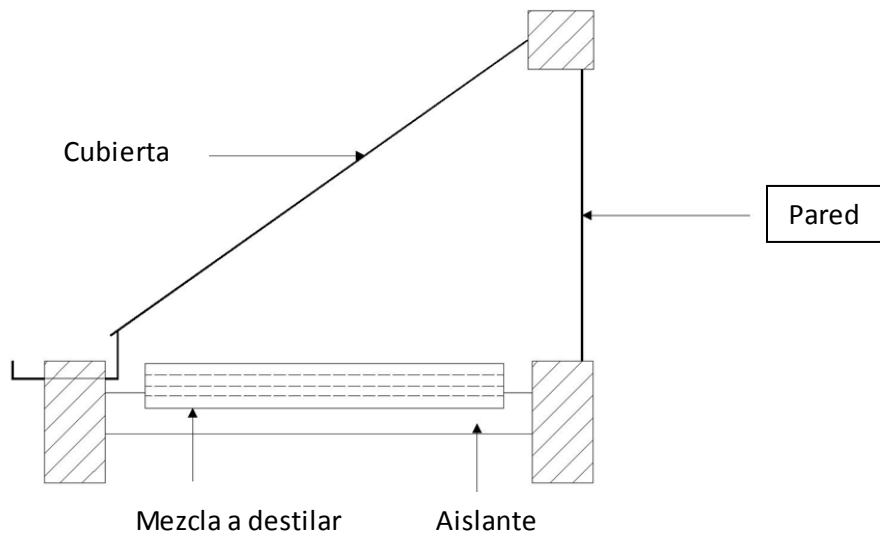


Figura 15 Destilador solar triangular

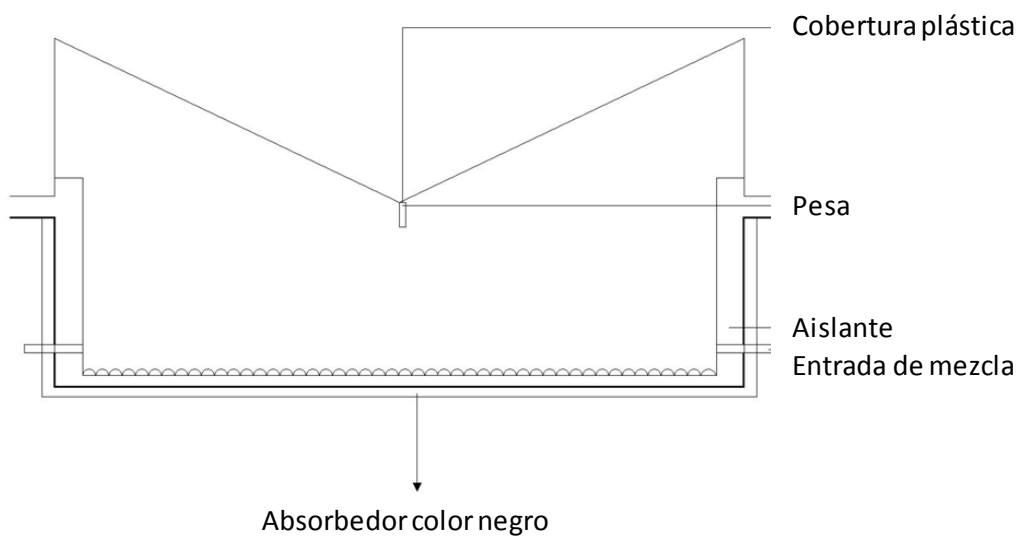


Figura 16 Destilador solar tipo V

2.5.2 Factores que influyen en el desempeño de los destiladores solares

Existe una larga lista de factores que tienen efecto sobre la eficiencia de los destiladores solares (Poblete, 2016; Kumar, 2015) los más importantes se enlistan en la tabla 5. Para el presente proyecto los factores que más pueden afectar la operación, por el tipo de material a evaporar son: las características de la película del fluido, la temperatura de evaporador, la velocidad de flujo y los coeficientes convectivo y evaporativo.

Tabla 5. Factores que influyen en el desempeño de los destiladores solares. Elaboración propia

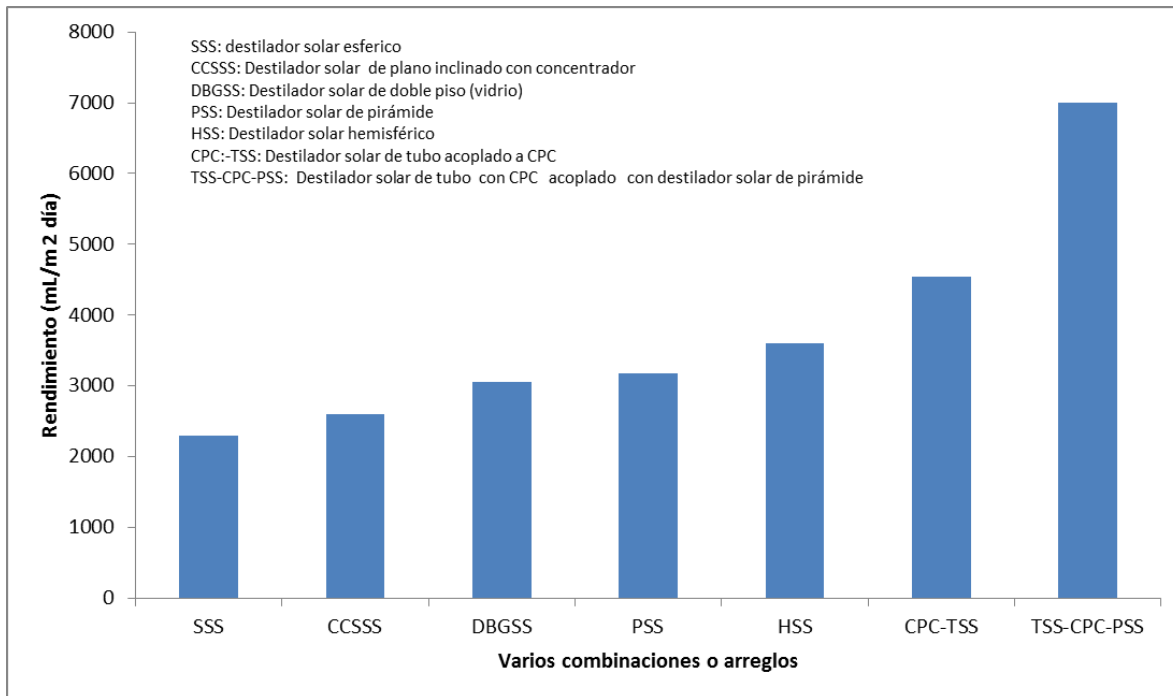
Factores	Fundamento
Tipo de cobertura	Diferentes características de los materiales
Película del fluido	Espesor, composición química, características fisicoquímicas
Temperatura	Diferencia de temperatura entre superficies de evaporación y condensación
Velocidad de flujo	Velocidad alta no permite incremento de temperatura Velocidad baja genera aumento de concentración, disminución de presión de vapor
Velocidad del viento	Responsable parcial del enfriamiento de la superficie de condensación
Radiación solar	Es variable, aporta la energía para el proceso
Tamaño del colector	Velocidad de flujo
Temperatura y humedad ambiental	Influye en el enfriamiento del condensador
Coefficiente conectivo y evaporativo	Diferencia de temperatura, espesor de película

2. 6 Selección del destilador solar

Los destiladores solares se han empleado en gran medida para obtener agua destilada, sin embargo en el presente estudio, el fluido a evaporar es una mezcla compuesta principalmente por azúcares y agua, por tanto algunos destiladores solares pasivos que usan grandes áreas para conseguir la evaporación, double basin, cascada, tipo v, escalonado no serán los más adecuados por el problema que implica esparcir el fluido. Son en este caso más adecuados los que emplean una charola o tubo como el triangular, esférico, hemisférico o cilíndrico. El uso de un destilador solar activo permitirá realizar la destilación a mayor velocidad. Lo anterior implica el uso de un concentrador y además de un fluido para enfriar el condensador.

En un estudio realizado bajo las mismas condiciones climatológicas en Coimbatore, India se han probado experimentalmente siete diferentes arreglos de destiladores solares. Los resultados experimentales muestran que el destilador solar tubular con un concentrador parabólico compuesto (CPC) acoplado a un destilador de tipo pirámide muestra la máxima productividad. La productividad del destilador solar depende enteramente de los parámetros climáticos responsables de incrementar la temperatura del agua. (Arunkumar, 2012)

En la gráfica 2 se puede observar los rendimientos dados por los diferentes arreglos de destiladores solares, los experimentos se han realizado para obtener agua destilada a partir de agua salada.



Gráfica 2 Variación de la productividad con respecto a la productividad total.

Tomado de T. Arunkumar, 2012.

Con base en los estudios referidos se considera realizar el diseño y la construcción de un prototipo de destilador solar múltiple que incremente la concentración solar a fin de aumentar la temperatura hasta 100° C. constando de:

- Destilador solar tubular
- Concentrador parabólico compuesto (CPC)
- Destilador tipo pirámide

Capítulo III

Bases para el diseño

3.1 Disponibilidad de la materia prima

En el municipio de Contepec en el estado de Michoacán las plantas de maguey crecen de forma silvestre, como se muestra en la fotografía 1. También se cultivan o se emplean como cerco. Contepec, junto con los municipios de Epitacio Huerta, Maravatío y Senguio constituyen la región en Michoacán donde se cultiva el agave, se ha estimado que se cultivan unas 426 hectáreas (inegi.gob, 1980). En muchas ocasiones la planta crece de manera silvestre o bien se le emplea como cerco o se le cultiva en zonas de muchos terrenos no aptos para la agricultura tradicional. Aun así, al llegar su término, se le cosecha. El precio de un maguey varía dependiendo de su tamaño y va desde 50 a 150 pesos. La cantidad de aguamiel depende de muchos factores entre los que destacan la frecuencia e intensidad de la raspa y el clima del sitio. El litro de aguamiel se vende desde 3 pesos hasta 5 pesos. Se vende por 10 litros a lo que se le llama una medida.

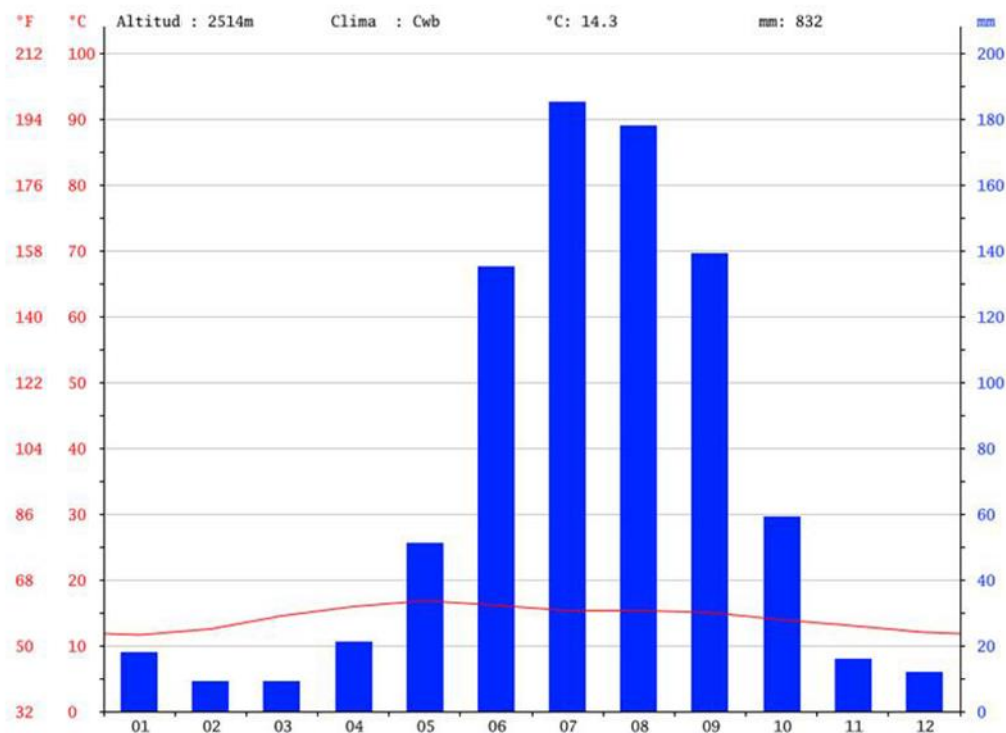


Fotografía 1 Plantas de Maguey (agave silviana) en Contepec Mich.

3.2 Estacionalidad de la operación

La planta de Maguey puede explotarse durante todo el año sin embargo para la producción de miel de agave la temporada adecuada es fuera del periodo de lluvia. Lo anterior para evitar que ocurra una dilución del aguamiel. De lo contrario, sí ocurre la dilución, trae consigo un mayor costo, un mayor gasto de energía y un tiempo mayor para realizar el proceso.

La temporada que suele emplearse para el procesamiento es de noviembre a mayo, temporada en que las lluvias en la región son muy escasas. (Merkel, 1982) En la gráfica 3 se muestra la dispersión de la precipitación a lo largo del año. Al trabajar el proceso en esta temporada se garantiza una alta concentración de azúcares en el aguamiel. El horario en el que se puede realizar el proceso es entre las 10:00 y las 18:00 horas. Lo anterior, para dar tiempo al proceso de recolección y acarreo.



Gráfica 3 Climograma Contepec tomada de Infosiap

3.3 Volúmen de operación

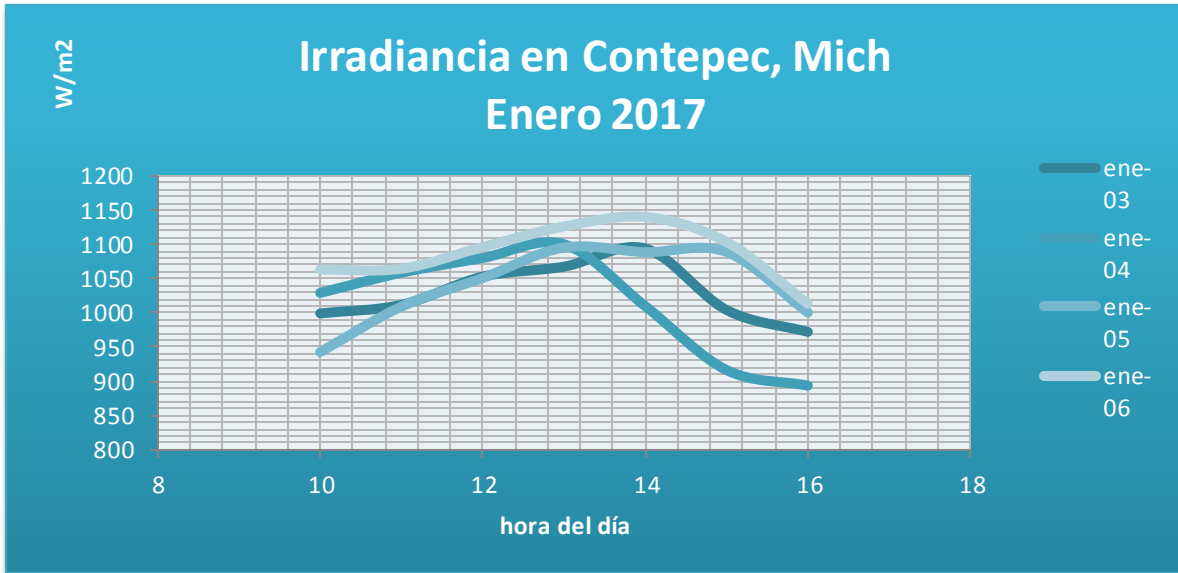
Se considera trabajar con un volúmen de 60 litros de aguamiel por día, lo que implica 20 litros en promedio entre la recolección de la mañana, medio día y tarde. De esta forma no se requiere de un medio de transporte y puede hacerse de forma manual. Para obtener 60 litros de aguamiel por día se necesita un promedio de 50 plantas de maguey en producción por temporada. Una persona puede llevar a cabo la recolección de aguamiel en un par de horas para la cantidad mencionada. Un volúmen mayor de operación implicaría el uso de un vehículo ó un mayor número de personas.

3.4 Energía y potencia solar

Con el propósito de constatar las mediciones obtenidas de la consulta bibliográfica (NASA), durante los primeros días del año 2017 se realizaron mediciones en el sitio donde se llevará a cabo la instalación del destilador solar. El piranómetro, que se muestra en la fotografía 2, fue colocado para medir la potencia solar máxima. Los datos obtenidos pueden ser observados en la grafica 4. La mayoría de las lecturas rebasa los 1000 W/m^2 . Lo anterior en concordancia con la referencia citada.



Fotografía 2 Mediciones de radiación solar (Enero 2017, Contepec Mich.)



Gráfica 4 Irradiancia en el municipio de Contepec Michoacán 3-6 enero 2017. Elaboración propia.

3.5 Cálculo del concentrador parabólico compuesto (CPC)

Para incrementar la temperatura del fluido a evaporar se requiere concentrar la radiación solar, en este caso se realizará con un concentrador parabólico compuesto (CPC) en dos dimensiones con absorbedor plano, considerando que el tubo de inoxidable será cortado en forma horizontal para formar una canaleta misma que estará colocada en el área correspondiente al absorbedor.

Para el dimensionamiento del concentrador se considera :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$G = 600 \frac{W}{m^2}$$

$$T = 125 \text{ } ^\circ\text{C} = 398.15 \text{ K}$$

$$\eta = 0.6 \text{ , } \alpha = \varepsilon$$

$$Q = \eta \cdot G \cdot a \cdot \alpha - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot b \quad (\text{ecuación 1})$$

Para T del absorbedor máxima

$\Rightarrow Q_u = 0$ por otra parte tenemos que:

$$C_g = \frac{b}{a} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\eta \cdot G \cdot \alpha} \quad (\text{ecuación 2})$$

Sustituyendo en (2)

$$C_g = \frac{5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} [398.15 \text{ K}]^4}{0.6 \left[600 \frac{W}{m^2} \right]} = 3,96 \approx 4$$

Se obtiene una concentración geométrica de cuatro.

Considerando un ángulo de aceptación:

$$\theta_0 = 10^\circ$$

$$C_{g\ 2D} = \frac{[2(1 + \sin(\theta_0))\sin(3\theta_0)]}{[1 - \cos(4\theta_0)]} - 1 \quad (\text{ecuación 3})$$

$$C_{g\ 2D} = 4.012 = \frac{b}{a}$$

$$b = A_{\text{absorción}} = 0.12m \times 1m = 0.12\ m^2$$

$$a = A_{\text{aceptación}} = 4(0.12m^2) = 0.48\ m^2$$

Utilizando las ecuaciones para truncamiento óptimo (27)

$$x(t) = \frac{[b(1 + \sin(\theta_0))\cos(t)]}{[(1 - \sin(t - \theta_0))]} \quad (\text{ecuación 4})$$

$$Y(t) = \frac{[b(1 - \sin(\theta_0))\sin(t)]}{[(1 - \sin(t - \theta_0))]} \quad (\text{ecuación 5})$$

Se procede a calcular la altura y ancho del CPC:

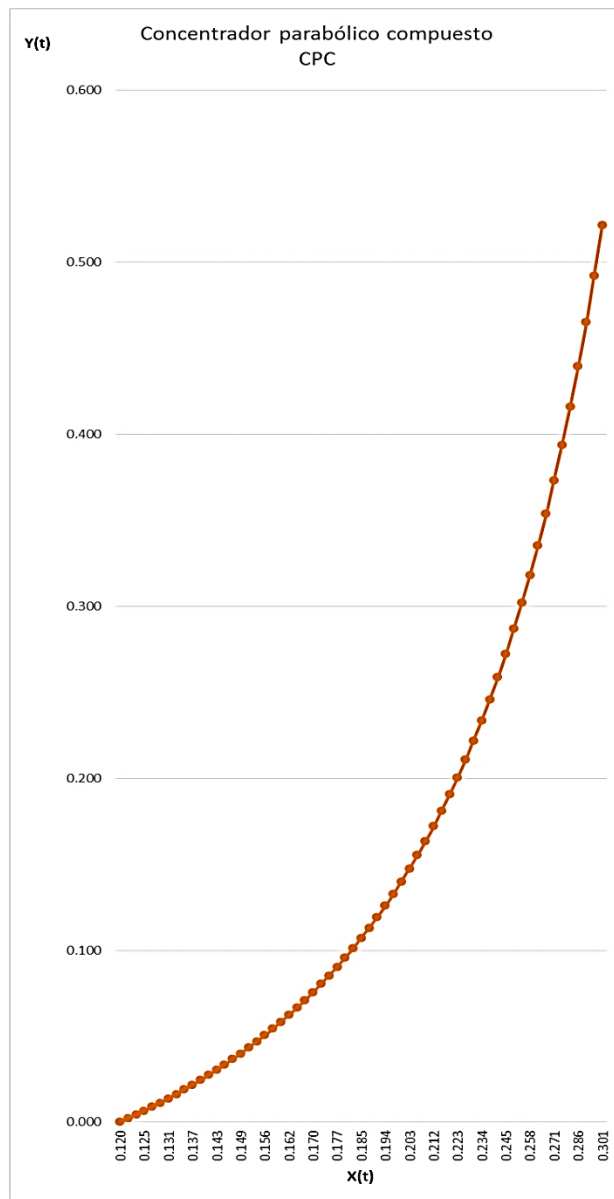
$$\text{para } t_{\text{óptimo}} = \frac{\pi}{2} - 3\theta_0 = 60^\circ \quad (\text{ecuación 6})$$

Tenemos:

$$\text{Ancho: } X(60^\circ) = 0.301\ m$$

$$\text{Altura: } H = Y(60^\circ) = 0.52\ m$$

Con las ecuaciones 4 y 5 ha sido trazada la curva para moldear las láminas de aluminio para la construcción del concentrador parabólico compuesto (CPC)



Gráfica 5 Trazo de la Parábola del CPC

El destilador solar de tubo se construirá de un largo de un metro, para ser tomado como base de cálculo y también por cuestiones de manejo y de financiamiento. En la tabla 6 se han anotado las dimensiones del destilador de tubo y en la tabla 7 las del destilador de pirámide.

Tabla 6. Dimensiones del destilador solar de tubo

Sección	Dimensiones	Unidades
Largo	1	m
Diámetro tubo de vidrio de borosilicato	80	mm
Espesor tubo de vidrio	4	mm
Diámetro del tubo de acero inoxidable	1.5	Pulgadas
Espesor tubo de acero inoxidable	1.7	mm
Corte sobre el tubo de inoxidable a lo largo (canal)	90	cm
Corte sobre el tubo de inoxidable a lo ancho (canal)	1	Pulgada
Área absorbedor	0.1075	m ²
Área del condensador	0.251	m ²

Tabla 7. Dimensiones del destilador solar de pirámide

Sección	Dimensiones	Unidades
Arista	0.38	m
Apotema	0.28	m
Altura	0.13	m
Lado	0.50	m
Ángulo (arista)	20	° grados
Ángulo (apotema)	27.24	° grados
Área condensador	0.28	m ²
Área del colector	0.1936	m ²
Espesor del vidrio	6	mm
Canaleta de aluminio (largo, interior)	45	mm
Canaleta de aluminio (ancho)	1	Pulgada
Canaleta de aluminio (alto)	$\frac{3}{4}$	Pulgada

3.6 Construcción de destilador solar tubular con CPC y destilador solar de pirámide

Una vez que se tiene el diseño de el CPC y que se ha dimensionado el destilador tubular y el destilador solar de tipo pirámide, como se muestra en la figura 17 , se procede a construir el prototipo. Para fines de dimensionamiento se toma como base un metro de longitud para el destilador tubular, con el propósito de evaluar su desempeño, realizar las pruebas operativas para determinar varios parametros como el flujo , porcentaje de evaporación, rendimiento y horarios de operación. Se estará midiendo, en tiempo real, la temperatura alcanzada por el absorbedor, el condensador, los diferentes caudales a través del equipo y los valores de irradiancia.

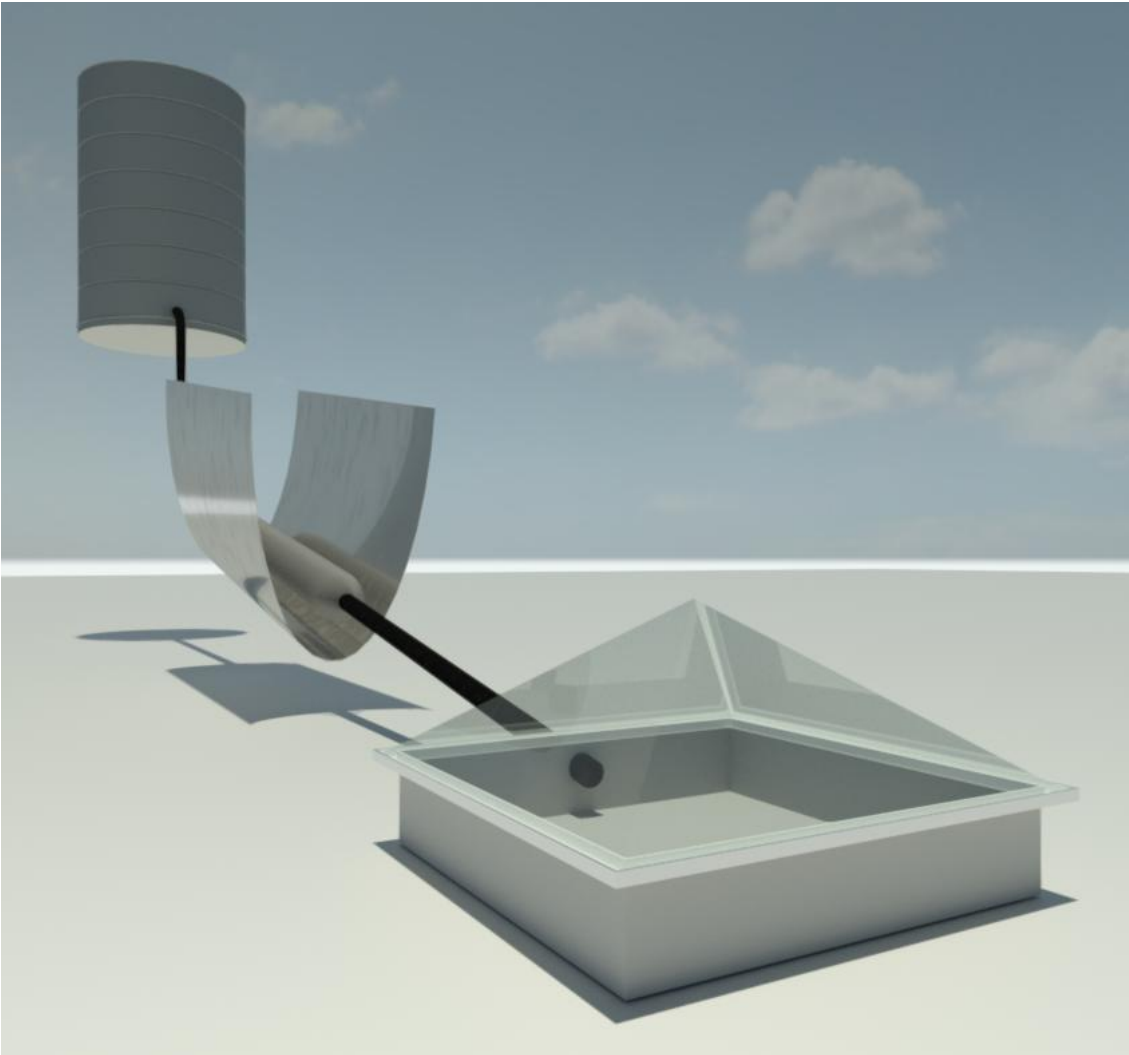


Figura 17 Esquema del prototipo de destilador solar

La construcción inicia con la preparación del tubo para llevar el flujo al absorbedor, en la fotografía 3 se observa la colocación de un conector de cobre a la válvula y las uniones de cobre-acero inoxidable, la cual fue hecha con soldadura de plata.



Fotografía 3 Válvula de esfera y tubo de acero inoxidable unido con soldadura de plata

Para la salida del vapor al absorbedor se le realizó un corte, como se muestra en la fotografía 4, la ranura es de $\frac{3}{4}$ de pulgada de ancho por 90 cm de largo.



Fotografía 4 Ranura en el tubo de acero inoxidable para formación del canal

El tubo de borosilicato 4.0 se ha manufacturado con entradas en los extremos, de 22 milímetros de diámetro, como puede apreciarse en la fotografía 5, para permitir el acoplamiento con el tubo de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Se le ha pintado de color negro mate por la parte exterior y sellado con silicón automotriz para alta temperatura en la unión con el tubo de borosilicato.



Fotografía 5 Destilador solar tubular, absorbedor y evaporador con salida para condensado.

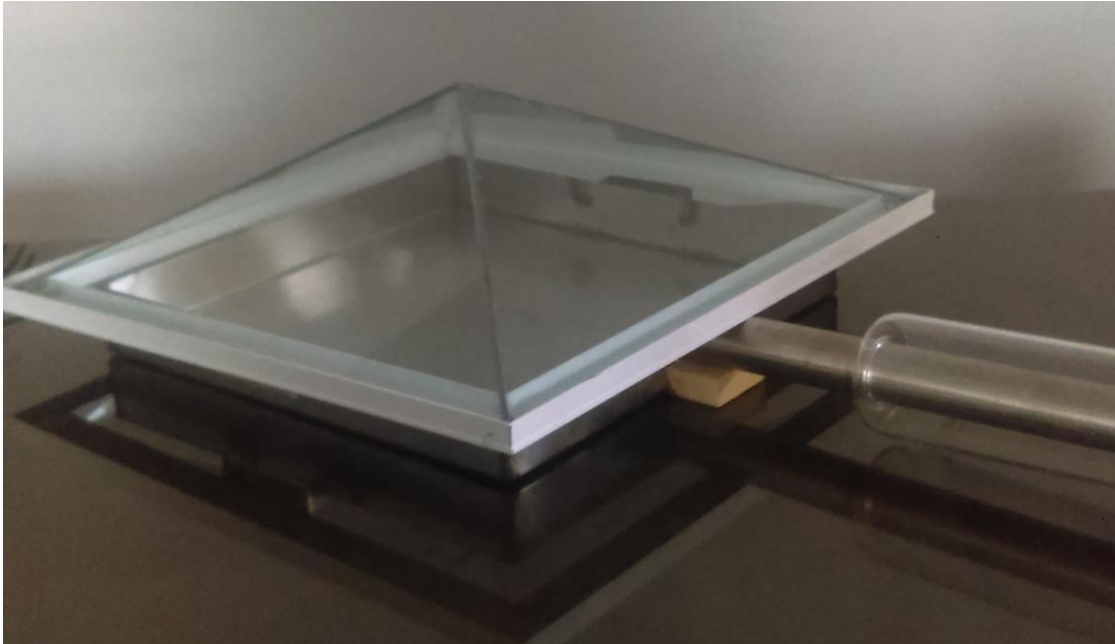


Fotografía 6 Armado del destilador solar de pirámide

Para la construcción del destilador de pirámide, como se muestra en la fotografía 6, los 4 vidrios de 6 mm de espesor fueron unidos también con silicón para alta temperatura. La pirámide se colocó sobre una canaleta de aluminio, como se aprecia en la figura 7. La canaleta se empleará para recuperar en condensado.



Fotografía 7 Destilador solar de pirámide, sobre canaleta de aluminio sellado con silicón para alta temperatura.



Fotografía 8 Destilador solar de pirámide acoplado a destilador solar tubular

Una vez que se concluyó la construcción de las distintas partes que darán forma al destilador solar, se procedió a ensamblarlas, como se observa en la fotografía 8.

Se utilizó soldadura de plata para las uniones de acero inoxidable y silicón de caucho para alta temperatura en las uniones de vidrio con acero. Una vez que el dispositivo fue armado se procedió a darle la inclinación de 20° sobre la superficie, mediante el empleo de una estructura de madera, además se hace la orientación hacia el polo sur con ayuda de una brújula.

3.7.1 Problemática

Uno de los problemas que se han enfrentado para la operación del destilador es con respecto al clima, los meses de agosto, septiembre y octubre han presentado una alta nubosidad.

Las pruebas de operación se han iniciado con agua con el fin de obtener información y determinar el flujo adecuado, previo a la operación con agua miel. Lo anterior para evitar el riesgo de que se pueda caramelizar la miel.

El tubo de un metro de largo, permite una corta exposición de la miel a una alta temperatura, evitando que puedan degradarse térmicamente muchas sustancias lábiles como vitaminas u oligosacáridos.

Para completar la destilación, a la salida del destilador de tubo, se ha colocado un destilador de pirámide, en donde continuará la evaporación a más baja temperatura.

3.8 Requerimientos energéticos auxiliares

La utilización de la energía solar será la base para la obtención de la miel de agave, se disponen de 6 horas diarias en meses en donde la radiación solar no es afectada en gran medida por la nubosidad, sin embargo la recolección de aguamiel por la tarde no podrá procesarse si no hasta el siguiente día. Debido a ello se contempla darle un tratamiento térmico al aguamiel para evitar la fermentación. Para este fin se usará gas LP, o la biomasa obtenida del maguey o bien el etanol obtenido por la fermentación de los subproductos. Será combustible auxiliar en caso de que haya nublados o lluvias.

Con algunos datos bibliográficos, anotados en la tabla 8, va a estimarse el gasto de energía requerida para evaporar una cantidad de agua igual a la que se pretende evaporar utilizando el destilador solar, con el fin de estimar, la energía aprovechada y el ahorro en términos monetarios.

Tabla 8. Datos para cálculo de gasto energético.

Contenido energético del gas LP	25763kJ /l gas LP
Precio del gas LP	9.75 \$/ l gas LP
Capacidad calorífica del agua	4.182 kJ/kg
Calor latente de vaporización del agua	2260 kJ/kg
Temperatura inicial	25 ° C
Temperatura final	100° C
Rendimiento	0.1 l miel de agave / l de agua miel

Para la evaporación se requieren:

$$q_e = m C_p \Delta T = m C_p (T_f - T_i)$$

$$q_e = \left((1 \text{ kg}) \left(\frac{4.182 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) (100 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) \right) = 313.65 \text{ kJ}$$

$$q_v = m \Delta H_v = (1 \text{ kg}) \left(\frac{2260 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) = 2260 \text{ kJ}$$

En total se necesitan:

$$q_T = q_e + q_v = 313.65 \text{ kJ} + 2260 \text{ kJ} = \mathbf{2573.65 \text{ kJ}}$$

Cantidad de gas Lp para evaporar un litro de agua:

$$V_{\text{gas LP}} = \frac{2573.65 \text{ kJ}}{25763 \text{ kJ/l gas Lp}} = 0.1 \text{ l gas Lp}$$

$$\text{Costo gas LP} = \left(\frac{0.1 \text{ l gas Lp}}{\text{kg agua}} \right) (9 \text{ kg agua}) \left[\frac{9.75 \$}{\text{l gas Lp}} \right] = \$ 8.8$$

El costo del gas Lp sería de 8.8 pesos por cada litro de miel de agave producido. Un setenta por ciento de este dinero podría ahorrarse con el empleo del destilador solar. Cabe señalar que se requieren procesar alrededor de 10 litros de aguamiel para obtener un litro de miel de agave y evaporar 9 litros de agua.

Capítulo IV

Resultados

4.1 Evaporador solar de tubo con CPC y Evaporador de pirámide.

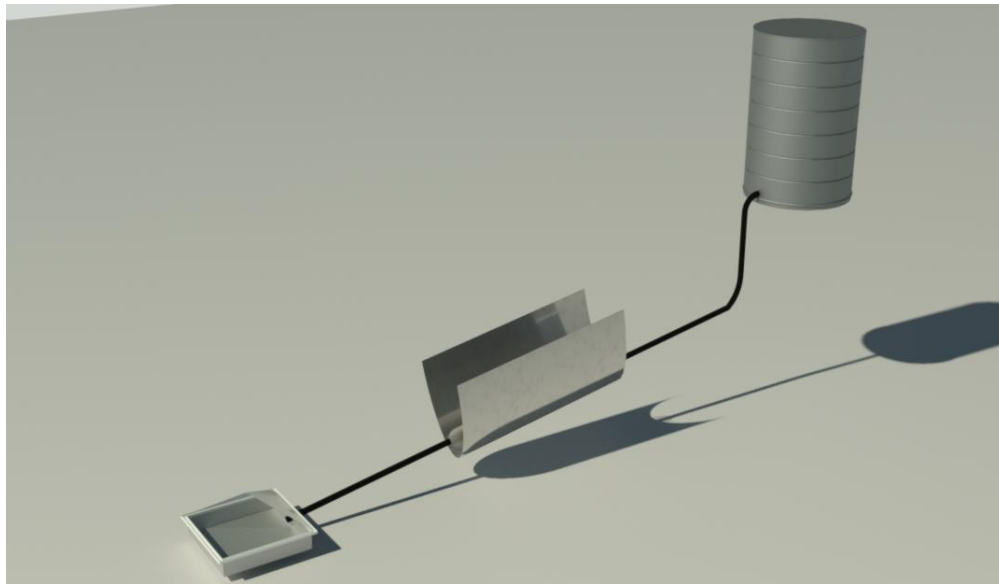


Figura 18 Proyecto del evaporador solar de tubo y pirámide con CPC

Un primer producto de la investigación realizada ha sido la construcción del destilador solar de tubo y pirámide con un concentrador parabólico compuesto



Fotografía 9 Destilador solar de tubo-CPC-Pirámide

4.1.1 Descripción del evaporador solar



Fotografía 10 Vista del evaporador solar y los instrumentos de medición empleados.

El dispositivo construido para funcionar como evaporador empleando energía solar consta de las siguientes partes:

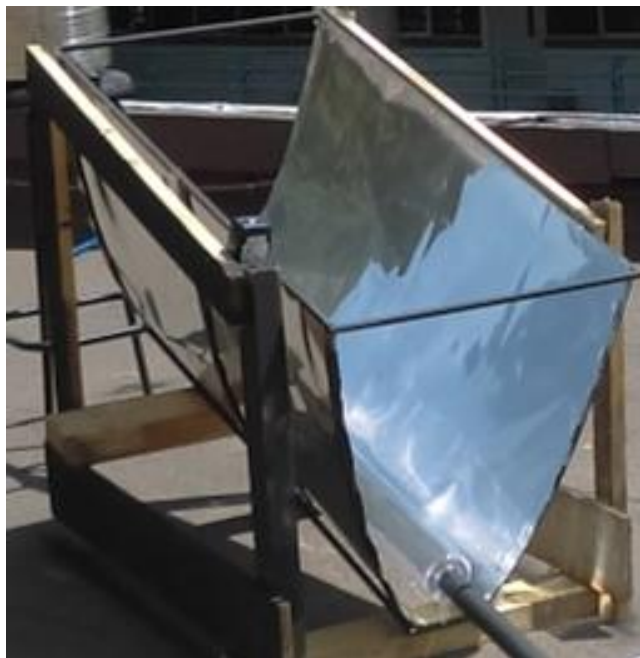
- a. Concentrador parabólico compuesto (CPC)
- b. Evaporador
- c. Condensador
- d. Ventilador
- e. Contenedor
- f. Tubos de conducción
- g. Válvula de paso

Además se colocaron los siguientes instrumentos de medición:

- h. Piranómetro
- i. Termopar
- j. Termómetro de infrarrojo
- k. Bureta
- l. Cronómetro

a.- Concentrador parabólico compuesto.

Este concentrador fue construido sobre una estructura de perfil cuadrado de hierro de media pulgada, curvado de acuerdo a la trayectoria de la parábola, que fue calculada para efectos del diseño. Tiene una concentración geométrica de cuatro. Como puede verse en la fotografía 10, El concentrador está formado por una lámina de aluminio reflejante Al 1100 H-14 Calibre 34.



Fotografía 11 Concentrador parabólico compuesto (CPC)

b.- Evaporador

La radiación solar directa y la reflejada por el concentrador, inciden sobre el evaporador, que es un tubo de acero inoxidable T-304 calibre 18 de 1.5 pulgadas de diámetro con un canal de tres cuartos de pulgada de ancho por 80 cm de largo. Está pintado de color negro mate por la parte externa como puede observarse en la fotografía 12, El evaporador se encuentra dentro del condensador. La utilización de acero inoxidable es en acato a la norma oficial mexicana NOM-093-SSA1-1994 que establece en el apéndice normativo A las características de los materiales para manejo de alimentos. (Secretaría de Salud, México. 2004)



Fotografía 12 Tubo de acero inoxidable ranurado, pintado por la parte exterior de color negro mate.

c.- Condensador

El vapor de agua que es formado en el evaporador se condensa al enfriarse sobre un tubo de vidrio de borosilicato 4.0 que es empleado como condensador, en la fotografía 13 se puede apreciar la imagen del tubo y el agua condensada. El tubo tiene un espesor de 5mm, diámetro interior de 80 mm y un metro de longitud, en ambos extremos tiene reducciones a 2

pulgadas. La unión entre evaporador y condensador ha sido sellada con silicón automotriz para alta temperatura color negro.



Fotografía 13 Condensador, tubo de borosilicato 4.0

d.- Ventilador

Empleado para conseguir la temperatura necesaria en el condensador se ha colocado un pequeño ventilador sobre el condensador. Las características del ventilador son: 6 pulgadas de diámetro, 127 v, 18 W, 60 Hz, 14.4 Wh, 2250 rpm y 114 CFM. El ventilador fue abastecido de un sistema fotovoltaico.

e.- Contenedor

El recipiente para colocar el fluido que va a introducirse al evaporador es de acero inoxidable tiene un volumen de 10 litros. Está conectado a un tubo de acero inoxidable de 1.5 pulgadas unido con soldadura de plata. Se encuentra elevado a una altura de 70 cm.

f.- Tubo conductor

El tubo para la circulación del fluido a evaporar es también de 1.5 pulgadas de acero inoxidable, pintado externamente de color negro mate. Se encuentra aislado con lana de vidrio en las zonas conectadas directamente al evaporador para limitar la transferencia de calor del evaporador hacia el ambiente.

g.- Contenedor

El recipiente para colocar el fluido que va a introducirse al evaporador es de acero inoxidable tiene un volumen de 10 litros. Está conectado a un tubo de acero inoxidable de 1.5 pulgadas unido con soldadura de plata. Se encuentra elevado a una altura de 70 cm.

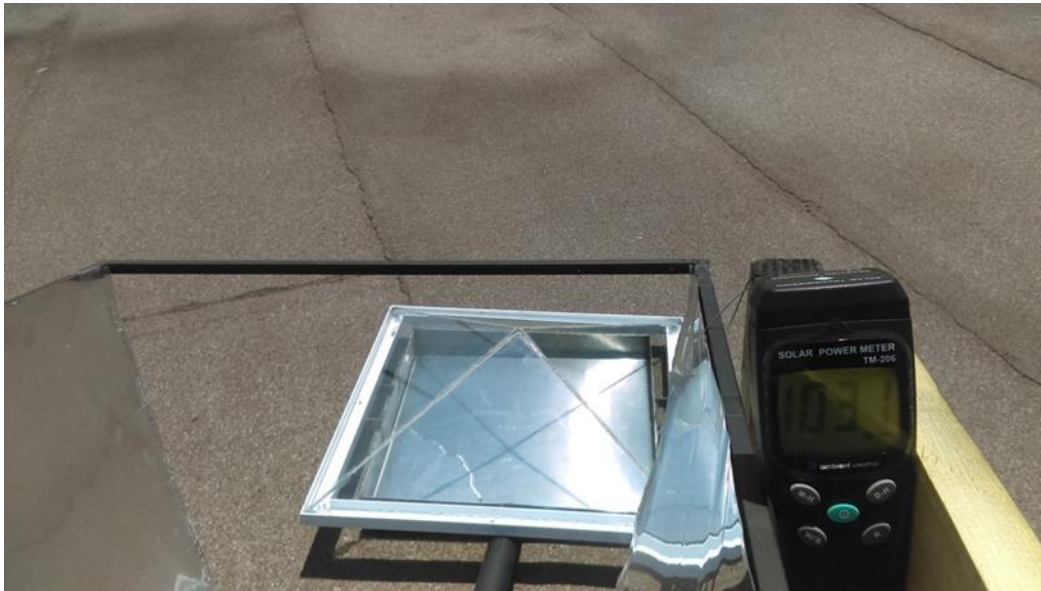
g. Válvula de paso

Permite regular el flujo de mezcla a evaporar.

Instrumentos de medición

h.- Piranómetro

Para determinar la irradiancia en tiempo real, es decir, al realizar las pruebas operativas del evaporador, se empleó un piranómetro digital (solar power meter) modelo TW-206, el cual se observa en la figura 14. Fue colocado con un ángulo de 21 grados, paralelo a la orientación del evaporador solar. Se mantuvo encendido y fijo durante las pruebas.



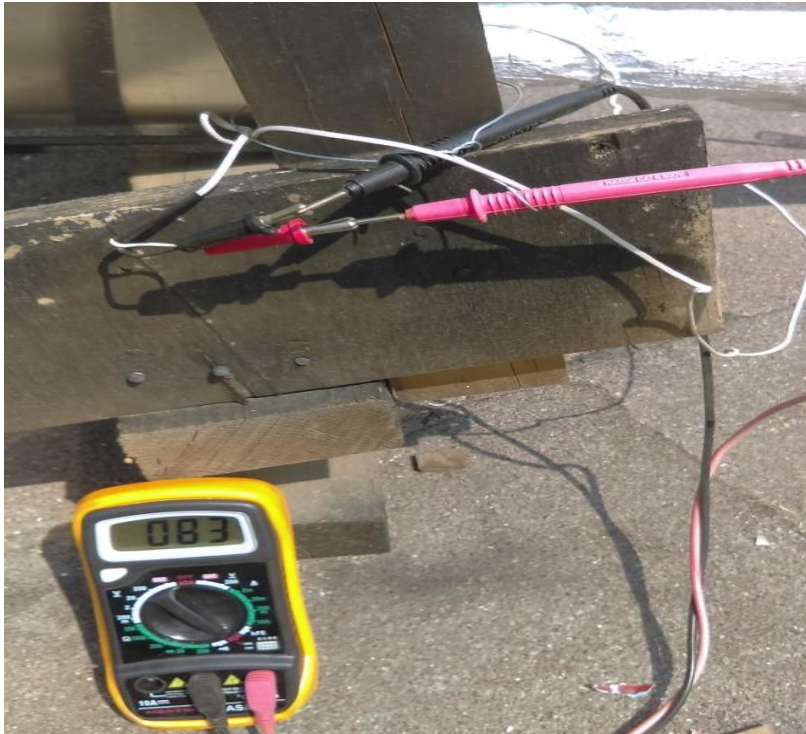
Fotografía 14 Piranómetro empleado para monitoreo de la irradiancia

i.- Termopar

Para la medición de la temperatura en el evaporador se emplearon termopares conectados a multímetro digital. plug-in electronics © Una primera sonda fue colocada a la entrada al evaporador y otra a la salida. Ambos con el detector bimetálico sobre el tubo de acero inoxidable.



Fotografía 15 Termopar para determinación de temperatura a la entrada del evaporador.



Fotografía 16 Termopar a la salida del evaporador

j.- Termómetro de infrarrojo

Para la determinación de la temperatura del condensador, tubo de borosilicato 4.0, se empleó un termómetro digital de infrarrojo que se muestra en la fotografía 17. Las lecturas fueron tomadas en 6 puntos a lo largo del tubo.



Fotografía 17 Determinación de la temperatura con el termómetro de infrarrojo.

k.-Bureta y probeta

Para medir con precisión el flujo hacia el sistema se ha empleado una bureta de marca Kimax ® de 25 mililitros junto con un cronometro. Para cuantificar la cantidad tanto de agua procedente del condensador como del concentrado desde el evaporador se ha empleado una probeta de 50 ml de vidrio pyrex ®

4.1.2 Descripción del funcionamiento del evaporador solar

En el depósito de acero inoxidable se coloca el fluido que se desea evaporar, en este caso aguamiel, a continuación se abre manualmente la válvula, una marca indicará el flujo máximo al que puede operar el equipo.

El fluido circula a través del tubo de acero inoxidable (cubierto con aislante) hasta llegar al evaporador. Un segmento de tubo que está en la posición del absorbedor de un concentrador parabólico compuesto (CPC). Al iniciar el paso por el evaporador el fluido incrementa su temperatura debido a la transferencia de calor del acero inoxidable al fluido. De inmediato comienza a formarse vapor

de agua, mismo que al tocar la superficie del tubo de vidrio de borosilicato condensa, aspecto que se observa en la fotografía 18. El tubo de vidrio es enfriado en la parte externa por una corriente de aire empujada por el ventilador.



Fotografía 18 Formación de condensado sobre la pared interior del tubo de borosilicato

El condensado formado (agua líquida a 41°C), puede verse en la fotografía 19. El condensado se desplaza hacia la parte inferior del tubo por acción de la gravedad hacia el punto donde tiene la descarga.



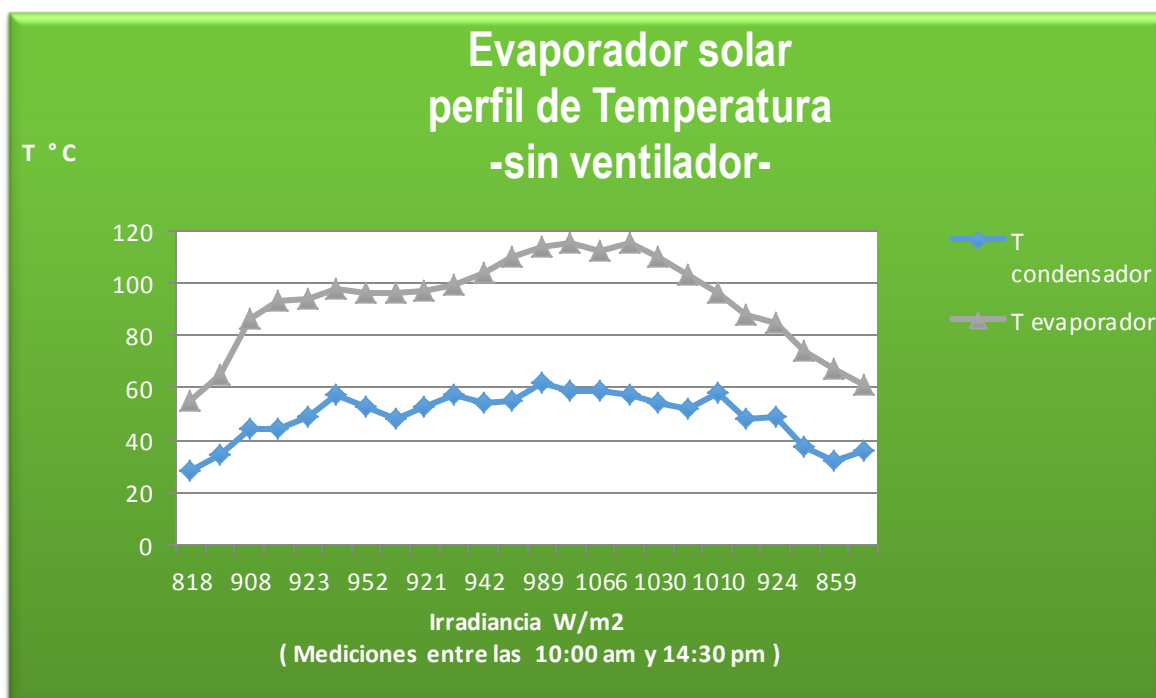
Fotografía 19 Determinación de la temperatura de salida del condensado

Por otra parte, en el evaporador se va formando un concentrado que circula por el tubo de acero inoxidable, aislado en esta zona, y es conducido al evaporador del destilador de pirámide. Ahí en forma pasiva se evapora otra fracción de vapor que va a condensarse sobre el vidrio del domo de pirámide.

Los volúmenes de condensado y concentrado respectivamente son cuantificados mediante el uso de una probeta de vidrio.

Las determinaciones de la temperatura al principio y al final del evaporador han sido monitoreadas por un par de termopares instalados a la entrada y a la salida del evaporador y registradas en los multímetros a donde se conectaron. La temperatura del condensador es determinada con el uso de un termómetro de infrarrojo de forma manual.

4.13 Perfil de Temperatura en el condensador y evaporador solar

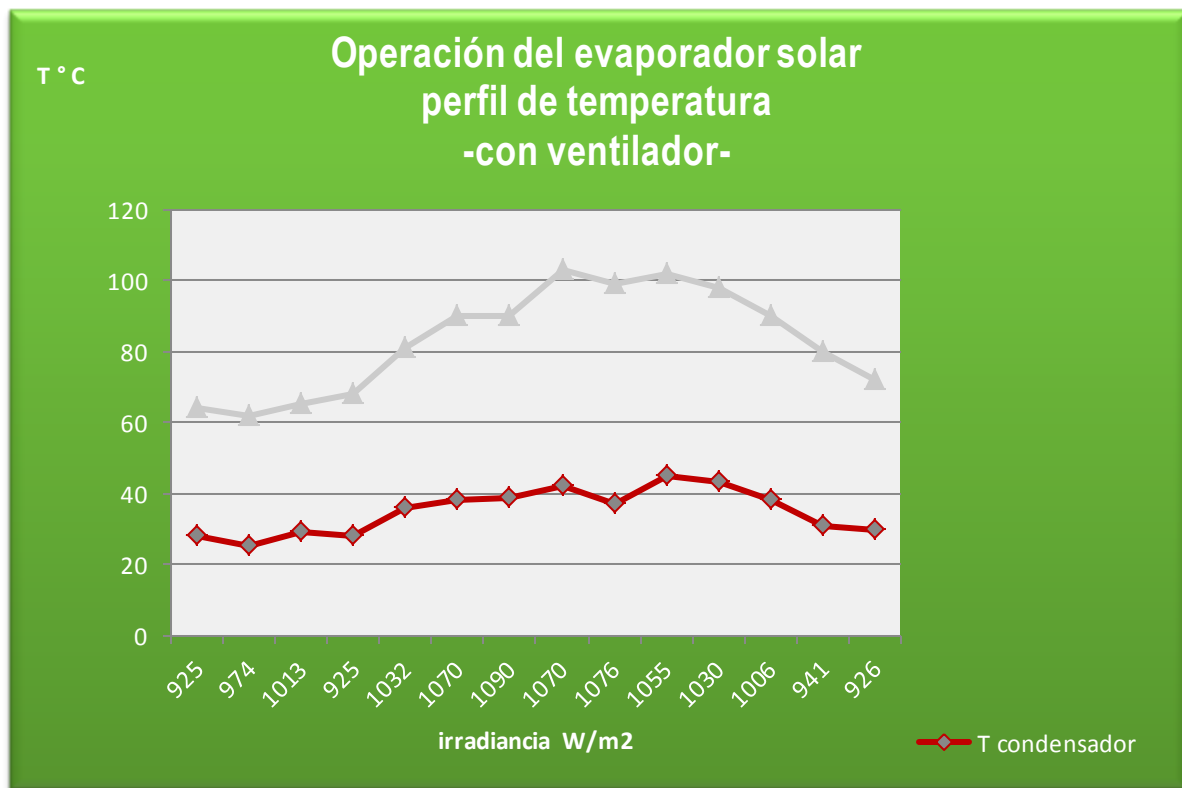


Gráfica 6 Temperatura en función de la irradiancia. Sin empleo de ventilador.

En la gráfica 6 se observa la variación de la temperatura en el evaporador y en el condensador en función de la irradiancia. Las temperaturas máximas registradas en la parte externa del absorbedor estuvieron alrededor de 60 ° C .La temperatura

interna del vidrio no fue medida pero es mayor debido al coeficiente de transferencia del material. En la parte operativa pudo observarse que la condensación no estaba ocurriendo de forma adecuada.

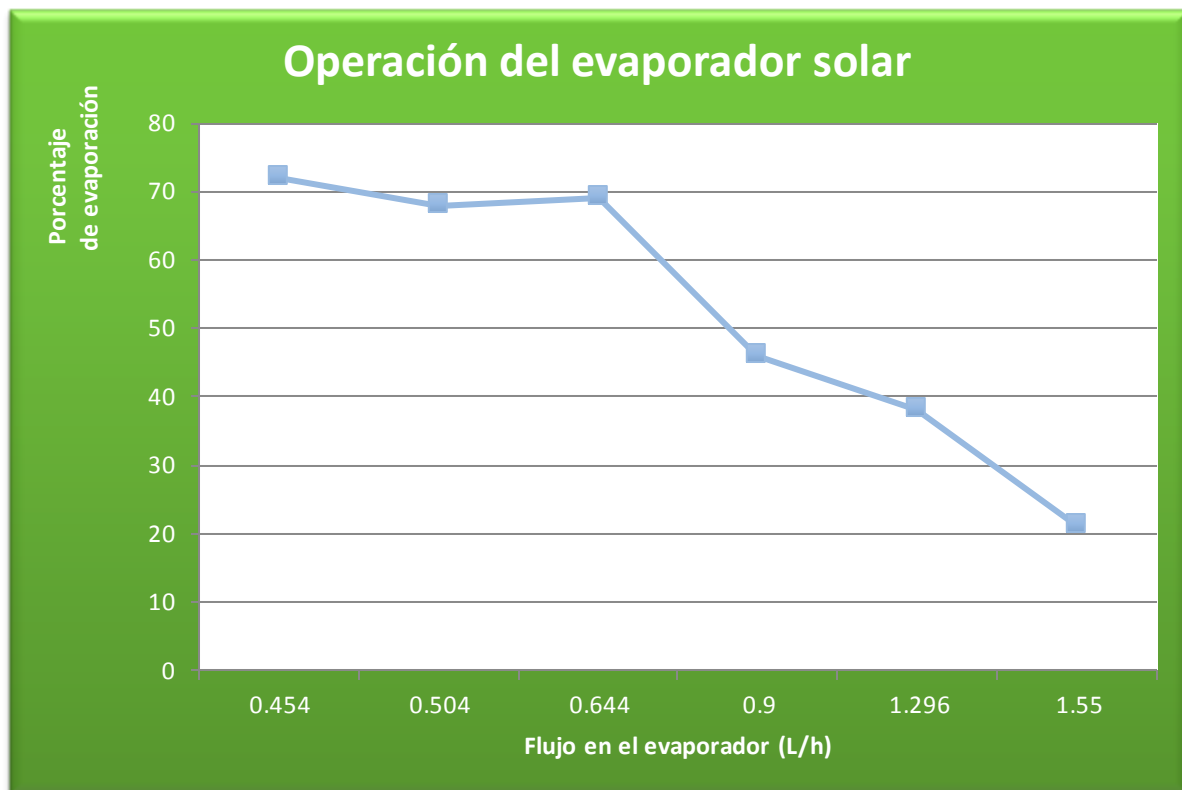
El resultado anterior lleva a considerar la instalación de un sistema de enfriamiento para el condensador. En varias de las experiencias sobre enfriamiento de condensadores se encontró el uso de agua fría, amoníaco o aire (Saidi, 2015; Sharan, 2017). Para este trabajo se optó por colocar un ventilador a corriente alterna alimentado desde un sistema fotovoltaico instalado ya en el lugar, en congruencia con el desarrollo del trabajo, en el plano de las energías renovables.



Gráfica 7 Temperatura en función de la irradiancia con empleo de un ventilador.

En la gráfica 7 se observa la temperatura en función de la irradiancia pero con la instalación de un ventilador en la parte superior del evaporador solar. Las temperaturas obtenidas en el condensador son menores que en las pruebas realizadas sin el ventilador. El resultado del enfriamiento con el ventilador ha sido una formación constante de condensado.

4.1.4 Porcentaje de evaporación



Gráfica 8 Porcentaje en masa de evaporación en función del flujo en el evaporador

En la gráfica 8 se obtuvo el porcentaje de evaporación del aguamiel en función del flujo a través del evaporador. Lo anterior muestra que este dispositivo proporciona mejores resultados para flujos en el evaporador de 0.5 litros por hora. Para flujos mayores el porcentaje de evaporación disminuye considerablemente debido a que el tiempo para la transferencia de calor desde el evaporador es pequeño en comparación con la velocidad de desplazamiento de fluido. Sin embargo para flujos menores, si bien ocurre un mayor porcentaje de evaporación, el aumento de la densidad y viscosidad del concentrado dificulta la operación del equipo. El riesgo de que la miel pueda quemarse o caramelizarse es latente.

La fotografía 20 muestra el aguamiel antes y después de someterla al proceso de evaporación. Un 71 por ciento en masa del material inicial fue evaporado. Se considera una evaporación parcial debido a que generalmente la miel de agave es evaporada por encima de un 80 por ciento.



Fotografía 20 Aguamiel y miel de agave parcialmente evaporada, 72 %.

La cantidad máxima de destilado obtenido en el evaporador solar de tubo y pirámide con CPC ha sido de $13.04 \text{ L/m}^2\cdot\text{día}$, empleando aire a velocidad para condensar el destilado y se ha conseguido una temperatura de 120°C en el absorbedor. Un estudio realizado en India por Akunkumar ha mostrado resultados de $7.0 \text{ L/m}^2\cdot\text{día}$, para un diseño similar, que empleó agua fría para condensar el destilado y en donde la temperatura máxima del absorbedor fue de 95°C . Cabe mencionar que aunque no se reporta la concentración geométrica del concentrador parabólico compuesto, ésta es seguramente menor a juzgar por el alto de las parábolas del CPC.

Conclusiones

El diseño del concentrador solar de concentración geométrica 4, ha sido calculado tomando en cuenta el análisis del truncamiento óptimo. Lo cual ha permitido adecuar el tamaño del concentrador en función de la concentración a conseguir, haciendo material y económicamente posible su construcción. Además los materiales de los que ha sido construido, perfil de acero de media pulgada y lámina reflejante de aluminio calibre 14, son de un costo muy accesible.

El empleo de vidrio de borosilicato 4.0 aunque costoso, resulta imprescindible. Este material por su dilatación térmica resiste el cambio de temperaturas que pueden darse con el vapor y luego en el proceso de condensación.

El acero inoxidable es un material que resulta adecuado en el manejo de alimentos por su facilidad para limpiarse y la resistencia a la oxidación además la normatividad sobre manejo de productos alimenticios lo especifica.

El rendimiento dado por el evaporador solar depende de los factores como irradiancia, velocidad y temperatura del viento, humedad, nubosidad, estacionalidad y demás factores climatológicos, además de las propiedades fisicoquímicas del fluido a evaporar y del estado fenológico de las plantas de agave. El efecto dado por el concentrador parabólico compuesto (CPC) ha jugado un papel de suma importancia para lograr que la temperatura en el absorbedor sea hasta de 140 ° C.

El concentrado de miel de agave ha conseguido ser evaporado a un 80 % de lo requerido, pues se requiere evaporar alrededor de un 90 % del agua contenida en el aguamiel y con el evaporador solar se ha obtenido un 71 % para un flujo de 0.45 litros por hora. El límite se ha establecido para evitar que la miel pueda caramelizarse o incluso quemarse al circular más lentamente en el evaporador. El proceso puede ser completado empleando otra fuente energética.

Cabe señalar que se requieren procesar alrededor de 10 litros de aguamiel para obtener un litro de miel de agave y evaporar 9 litros de agua. El costo del gas LP sería de 8.8 pesos por cada litro de miel de agave producido.

El agua que se obtiene del condensador tiene una temperatura de 42°C en promedio. Puede ser utilizada para lavado de los utensilios empleados en el manejo de la miel o bien pudiera emplearse en un intercambiador de calor para precalentar el aguamiel, previo a su proceso de evaporación en el destilador solar.

Recomendaciones

Algunos aspectos y mejoras al evaporador solar que con el desarrollo del experimento fueron mostrándose pueden ser:

- a) Reducción en los tubos de conducción con el propósito que sean más adecuados con los caudales manejados.
- b) Experimentar con canal rectangular o parabólico, en vista de que el canal circular, no se satura con el flujo empleado.
- c) Instalar un sensor y válvula electrónica para manejo de flujo en función de la irradiancia, con el objeto de aumentar la eficiencia del equipo.
- d) Realizar un escalamiento a un metro cuadrado. En este caso se ha trabajado para 0.1075 m^2 , llevar el escalamiento a un metro cuadrado o más permitiría tener datos de operación para una escala comercial.
- e) Evaluar para otras aplicaciones; el evaporador solar podría utilizarse también para calentar agua, generar vapor u obtener agua destilada por ejemplo.

Índice de figuras

<i>Figura 1 Radiación diaria promedio en el año (cal/cm².día) tomada de Almanza, 1978.</i>	18
<i>Figura 2 Niveles de energía solar sobre la superficie de la tierra (Quanhua, 2009)</i>	19
<i>Figura 3 Mapa de localización del municipio de Contepec, Mich.</i>	26
<i>Figura 4 Plano del municipio de Contepec</i>	26
<i>Figura 5 Plano del poblado de Contepec</i>	27
<i>Figura 6 Exportación de miel de maguey, tomada de Hernández F. 2006</i>	31
<i>Figura 7 Precio internacional de la miel de agave, tomado de</i>	31
<i>Figura 8 Proceso de producción de miel de agave y generación de subproductos. Elaboración propia</i>	33
<i>Figura 9 Destilador solar esférico</i>	36
<i>Figura 10 Destilador solar hemisférico</i>	36
<i>Figura 11 Destilador solar de pirámide</i>	37
<i>Figura 12 Destilador solar de doble piso</i>	37
<i>Figura 13 Destilador solar tubular</i>	38
<i>Figura 14 Destilador solar de tipo escalera</i>	38
<i>Figura 15 Destilador solar triangular</i>	39
<i>Figura 16 Destilador solar tipo V</i>	39
<i>Figura 17 Esquema del prototipo de destilador solar</i>	52
<i>Figura 18 Proyecto del evaporador solar de tubo y pirámide con CPC</i>	59

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Composición fisicoquímica del jarabe de Agave. Tomada de Muñiz-Márquez, 2015.....</i>	15
<i>Tabla 2 Irradiación en Contepec, Michoacán. Con datos de la NASA.....</i>	28
<i>Tabla 3 Productores de miel de maguey en México, tomada de Hernández, 2006.</i>	30
<i>Tabla 4. Principales tipos de destiladores solares pasivos. Elaboración propia.....</i>	35
<i>Tabla 5. Factores que influyen en el desempeño de los destiladores solares. Elaboración propia ..</i>	40
<i>Tabla 6. Dimensiones del destilador solar de tubo</i>	50
<i>Tabla 7. Dimensiones del destilador solar de pirámide</i>	51
<i>Tabla 8. Datos para cálculo de gasto energético.</i>	57

Índice de fotografías

Fotografía 1 Plantas de Maguey (agave silviana) en Contepec Mich	43
Fotografía 2 Mediciones de radiación solar (Enero 2017, Contepec Mich.)	45
Fotografía 3 Válvula de esfera y tubo de acero inoxidable unido con soldadura de plata	53
Fotografía 4 Ranura en el tubo de acero inoxidable para formación del canal	53
Fotografía 5 Destilador solar tubular, absorbedor y evaporador con salida	54
Fotografía 6 Armado del destilador solar de pirámide	54
Fotografía 7 Destilador solar de pirámide, sobre canaleta de aluminio sellado con silicón para alta temperatura.	55
Fotografía 8 Destilador solar de pirámide acoplado a destilador solar tubular	56
Fotografía 9 Destilador solar de tubo-CPC-Pirámide	60
Fotografía 10 Vista del evaporador solar y los instrumentos de medición empleados.	60
Fotografía 11 Concentrador parabólico compuesto (CPC)	61
Fotografía 12 Tubo de acero inoxidable ranurado. Pintado negro mate exterior	62
Fotografía 13 Condensador, tubo de borosilicato 4.0	63
Fotografía 14 Piranómetro empleado para monitoreo de la irradiancia	64
Fotografía 15 Termopar para determinación de temperatura a la entrada del evaporador.	65
Fotografía 16 Termopar a la salida del evaporador	65
Fotografía 17 Determinación de la temperatura con el termómetro de infrarrojo.	66
Fotografía 18 Formación de condensado sobre la pared interior del tubo de borosilicato	67
Fotografía 19 Determinación de la temperatura de salida del condensado	67
Fotografía 20 Aguamiel y miel de agave parcialmente evaporada, 72 %.	71

Índice de gráficas

Gráfica 1 Irradiación en Municipio de Contepec. Elaboración propia con datos de NASA	29
Gráfica 2 Variación de la productividad con respecto a la productividad total.	42
Gráfica 3 Climograma Contepec tomada de Infosiap	44
Gráfica 4 Irradiancia en el municipio de Contepec Michoacán 3-6 enero 2017. Elaboración propia.	46
Gráfica 5 Trazo de la Parábola del CPC	49
Gráfica 6 Temperatura en función de la irradiancia. Sin empleo de ventilador.	68
Gráfica 7 Temperatura en función de la irradiancia con empleo de un ventilador.	69
Gráfica 8 Porcentaje en masa de evaporación en función del flujo en el evaporador	70

Sistema de variables

Variable	Simbolo	Unidad
Temperatura	T	° C, K
Área	A	m ²
Diámetro	D	m
Tiempo	T	día, h, s
Longitud	L	m
Potencia	P	W
Energía	E	J
Irradiancia	G	W / m ²
Irradiación	H	J /m ² día
Concentración geométrica	Cg	Adimensional
Área del absorbedor	B	m ²
Área de aceptación	A	m ²
Ángulo de apertura	Θ _o	Grados

Gasto	F	m³ / s
Conductividad térmica	K	W/ m.K
Coefficiente convectivo de transferencia de calor	H	W/m ² K
Coefficiente global de transferencia de calor	U	W/m ² K
Densidad	ρ	kg/m ³
Emitancia	E	%
Absortividad	A	%
Energía por unidad de tiempo	Q	J/s
Constante de Boltzmann	Σ	W/ m ² K ⁴

Instrumentos de recolección de datos

Instrumento	Variable	Unidades
Piranómetro	Irradiancia	W/m ²
Termómetro de infrarojo	Temperatura	° C
Termopar	Temperatura	° C
Termómetro de alcohol	Temperatura	° C
Cronómetro	Tiempo	Segundos
Brújula	Norte magnético	
Flexómetro	Distancia	m
Probeta	Volumen	ml

Propiedades térmicas y ópticas de materiales utilizados

Material	Conductividad Térmica, k $W\ m^{-1}\ K^{-1}$	Emisividad ϵ	Absortividad α
Aluminio	206 (100 ° C)	0.04	0.1
Acero inoxidable 304	16.3	0.52	0.33
Vidrio de borosilicato 4.0	1.2	0.94	0.12
Pintura de aceite negro mate	-	0.97	0.75
Lana de vidrio	0.0549 (93.3°C)	-	-

Con datos de H. Perry y C. Chilton. *Chemical Engineers Handbook* 6 ed New York:McGraw-Hill, Book Company.

Glosario

Área de absorbedor: es el área donde se concentra la radiación solar y es justo donde se lleva la transferencia de calor por radiación.

Area de aceptación: también llamada área de apertura es la región por donde cruza la radiación solar hacia el concentrador.

Biomasa: Materia orgánica de origen animal o vegetal que puede ser utilizada con fines energeticos.

Coefficiente convectivo: Cuantifica la tasa de transferencia de calor convectivo de o hacia una superficie.

Concentración geométrica: es el cociente entre el área de apertura del concentrador y el área de salida

Destilador solar: Dispositivo para separar mezclas con base a su punto de ebullición que utiliza al sol como fuente de energía

Irradiación: Energía que incide sobre una superficie en una unidad de tiempo

Irradiancia: Potencia incidente por unidad de área

Radiación: Emisión, propagación y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas.

Solar-térmico: Energía radiante del sol transformada en energía calorífica

Sustentable: Metodología en donde el cuidado al ambiente es de primera importancia sin descuidar el bienestar de las generaciones futuras.

Referencias

- 1- Almanza, R., & López, S. (1978). Total solar radiation in Mexico using sunshine hours and meteorological data. *Solar Energy*, 21(5), 441-448. doi:10.1016/0038-092X(78)90178-0
- 2- Benedicto, E. (29 de diciembre de 2014). Ecoinventos.com. Recuperado el 8 de febrero de 2017, de <http://ecoinventos.com/calentador-solar/>
- 3- Boquera, M. L., & Champo-Jiménez, O. (2016). Proceso de deforestación en el municipio de Cherán, Michoacán, México (2006-2012). (Spanish). *Madera Y Bosques*, 22(1), 141-153.
- 4- Coordinación de Estrategia Digital Nacional. (23 de octubre de 2014). <http://datos.gob.mx>. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- 5- Corbin, K. R., Byrt, C. S., Bauer, S., DeBolt, S., Chambers, D., Holtum, J. M., & ... Burton, R. A. (2015). Prospecting for Energy-Rich Renewable Raw Materials: Agave Leaf Case Study. *Plos One*, 10(8), e0135382. doi:10.1371/journal.pone.0135382
- 6- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- 7- Earth Observing System Data and Information System . (1991). eosweb.larc.nasa.gov. Recuperado el 7 de diciembre de 2016, de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- 8- Google LLC . (8 de febrero de 2005). google.com.mx/maps. Recuperado el 5 de octubre de 2016, de <https://www.google.com.mx/maps/place/Contepec,+Mich./@19.9608389,100.3441335,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x85d2e1232d17aa53:0x1cd057fad8353f22!8m2!3d19.9520791!4d100.166319>

-
- 9- Hernandez Sanchez, F. G., & Quintero Soto, M. L. (2006). Produccion comercializacion miel maguey organica certificada valle del Cardonal, Hidalgo.
- 10- Inafed.gob.mx. (2017). Michoacán de Ocampo - Contepec. [online] Available at: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16017a.html> [Accessed 7 Mar. 2017].
- 11- inegi.gob. (1980). Recuperado el 6 de 10 de 2017, de 1- http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825150082/702825150082_3.pdf
- 12-IPCC. Eliminar combustibles fósiles y usar energías renovables frenaría cambio climático. UPI Chile, 13 Apr. 2014. Informe Académico, go.galegroup.com/ps/i.do?p=IFME&sw=w&u=unam1&v=2.1&id=GALE%7CA364763305&it=r&asid=0853a7d74c7645c8d2992242d185a8d1. Accessed 8 Feb. 2017.
- 13-Kumar, H. M. (2015). A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar still. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2-24.
- 14- Merkel, A. (1982). [climate-data.org](https://es.climate-data.org). Recuperado el 12 de abril de 2017, de <https://es.climate-data.org>
- 15-Mielenz, J., Rodriguez, M., Thompson, O., Yang, X., & Yin, H.). (2015). Development of Agave as a dedicated biomass source: Production of biofuels from whole plants. *Biotechnology For Biofuels*, 8(1), doi:10.1186/s13068-015-0261-8

- 16-Muñiz-Márquez, D., Contreras, J., Rodríguez, R., Wong-Paz, J., Aguilar, C., Mussatto, S., & Teixeira, J. (2015). Influence of thermal effect on sugars composition of Mexican Agave syrup. *CYTA - Journal Of Food*, 13(4), 607-612. doi:10.1080/19476337.2015.1028452
- 17-Narváez-Suárez, A. U., Jiménez-Velázquez, M. A., Martínez-Saldaña, T., & Cruz-Galindo, B. (2016). MAGUEY PULQUERO (Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck): OPCIÓN PARA DESARROLLO RURAL. (Spanish). *Agroproductividad*, 9(10), 56.
- 18- Perry, R. (2000). En *Manual del ingeniero químico* (pág. capítulo 10). Mexico: Mc-Graw-Hill.
- 19-Poblete, R., Salihoglu, G., & Kamil Salihoglu, N. (2016). Investigation of the factors influencing the efficiency of a solar still combined with a solar collector. *Desalination and Water Treatment*, 57(60). <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1202872>
- 20-Quanhua, L., Gengfa, Y., & Jue J., L. (2009). SOLAR RADIATION AS LARGE-SCALE RESOURCE FOR ENERGY-SHORT WORLD. *Energy & Environment*, (3), 319.
- 21-Rincon Mejia, E. (1999). *Estado del arte de la investigacion en energia solar en Mexico*. México : Fundación ICA, 1999.
- 22-Romero López, M., Osorio Díaz, P., Flores Morales, A., Robledo, N., & Mora Escobedo, R. (n.d). Chemical composition, antioxidant capacity and prebiotic effect of aguamiel (Agave atrovirens) during in vitro fermentation. 2015.
- 23-Saidi, S., Ben Radhia, R., Dhifaoui, B., & Ben Jabrallah, S. (2015). Experimental study of the inclined solar film evaporator. *Desalination & Water Treatment*, 56(10), 2576-2583. doi:10.1080/19443994.2014.981415

-
- 24-Secretaria de salud, Mexico. (2004). www.salud.gob.mx. Recuperado el 7 de marzo de 2018, <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/093ssa14.html>
- 25-Sharan, P., & Bandyopadhyay, S. (2017). Solar assisted multiple-effect evaporator. *Journal Of Cleaner Production*, 1422340-2351. doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.043
- 26-T. Arunkumar, K. V. (2012). Experimental Study on Various Solar Still Designs. *ISRN Renewable Energy*, 10.
- 27-Tapia S., S., & del Río P., J.A.. (2009). Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. *Revista mexicana de física E*, 55(2),141-153.RetrieveSeptember17,2017,fromhttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35422009000200002&lng=en&tlng=en.
- 28-Willems, J., & Low, N. (2012). Major carbohydrate, polyol, and oligosaccharide profiles of agave syrup. Application of this data to authenticity analysis. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 60(35), 8745-8754. doi:10.1021/jf3027342