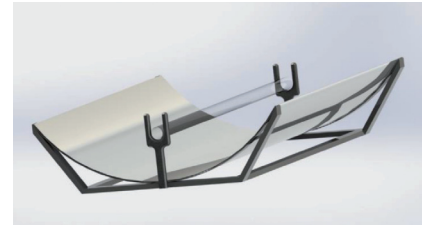


Colector cilindro parabólico a partir de material de bajo costo (acero inoxidable) aplicado a un sistema híbrido de deshidratado



Cylindrical parabolic collectors material from low cost (stainless steel) applied to dried hybrid energy system



Yazmani García-Ortiz¹, Javier Yáñez-Mendiola¹, Loreto Valenzuela²

¹ CIATEC. Dpto. de Investigación y Post-gradados. Calle Omega, 201 – 37545 León de los Aldama. Guanajuato (México). Tfno. +52 4777100011. ygarcia.picyt@ciatec.mx

² CIEMAT. Plataforma Solar de Almería. Ctra. Senés km 4.5 – 04200 Tabernas (Almería). Tfno. +34 950 387934

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7540> | Recibido: 21/01/2015 • Aceptado: 20/04/2015

ABSTRACT

• The proposed work describes the construction of a compact dehydrated hybrid system with solar energy application using cylindrical-parabolic collectors (CPC), whose reflective material is stainless steel. This material is vital to the system due to the steel plates' high durability and hardness above 190 vickers, and their easy acquisition. Using a standard polishing process the maximum height of the roughness, among other parameters was reduced considerably. The maximum average efficiency reflective was 0.70. With this a PTC is herein presented able to achieve sufficient thermal efficiency capable of covering the energy demand of processes such as is the case with the chili-pepper dehydration. Its efficiency is validated by the comparison with other CPCs commercially available, with similar characteristics.

The proposed CPC system has a brick tunnel coated internally with cement. Its dimensions are 1.8 m x 2.3 m x 21 m and a conventional energy support module. The product is placed on racks inside the tunnel, through which hot air flows injected by means of a fan. The required temperature ranges from 70 to 90 °C, depending on the type of product. The drying time is about 36 hours. Its main advantages over other dehydrating thermal systems using fossil fuels are that it has a cost reduction of approximately 40% with a similar reduced greenhouse gas emission, while also being able to dehydrate large quantities of product.

• **Keyword:** hybrid system, abrasives, cylindrical-parabolic collector, stainless steel, reflectance, polished.

RESUMEN

El trabajo propuesto describe la construcción de un sistema híbrido compacto de deshidratado con aplicación de energía solar mediante Colectores Cilindro-Parabólicos (CCPs), cuyo material reflectante es acero inoxidable lo cual representa una parte modular del sistema ya que las placas para su elaboración son de fácil adquisición en el mercado, gran durabilidad, y una dureza por arriba de los 190 vickers con lo que mediante un proceso estandarizado de pulido, logra disminuir considerablemente la altura máxima de la rugosidad de la superficie entre otros parámetros, alcanzando así, su máxima eficiencia reflectiva en promedio 0.70. Con esto se propone un CCP capaz de lograr una eficiencia térmica

suficiente para abastecer la demanda energética del método de deshidratado de diferentes productos y procesos, en este caso particular el deshidratado de chile, su eficiencia es validada mediante el comparativo con otros CCPs disponibles en el mercado de características dimensionales similares.

Con lo anterior se propone un sistema híbrido que consta básicamente de un campo solar de CCPs, un túnel de deshidratado hecho de ladrillo y recubierto internamente con cemento, sus dimensiones son 1.8 m X 2.3 m X 21 m y un sistema de apoyo energético convencional; el producto se colocan en racks en el interior del túnel, a través del cual circula aire caliente inyectado por medio de un ventilador. La temperatura requerida puede variar desde 70 a 90 °C dependiendo del tipo de producto, el tiempo de secado es de alrededor de 36 horas. Su ventaja principal con respecto a otros sistemas térmicos de deshidratado que utilizan combustibles fósiles, es que tiene una reducción de costos de aproximadamente un 40% al igual que la disminución de emisión de gases tipo invernadero, además, puede deshidratar grandes cantidades de producto como ya se había mencionado.

Palabras clave: sistema híbrido, abrasivos, concentrador cilindro-parabólico; acero inoxidable; reflectancia; pulido.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de deshidratado se puede considerar artesanal en forma general. La finalidad de este proceso es minimizar las pérdidas durante el almacenamiento, reducir costos de transporte, así como aumentar la vida del producto [1]. En cuanto a deshidratado solar, existen básicamente cuatro tipos: secadores directos, secadores indirectos, secadores de modo mixto y secadores solares híbridos. Otra técnica es el secado térmico, que es el método más común para el secado de productos agrícolas usando la fuente de calor derivada de combustibles fósiles y/o de la electricidad. Existen diferentes problemáticas al realizar el deshidratado de esta manera, las principales son el requerimiento de grandes espacios abiertos, lo que además ocasiona que el cultivo esté expuesto a diferentes adversidades tales como polvo, insectos, roedores y otros agentes [2]. Por otro lado, la velocidad de secado es lenta en los sistemas de secado tradicionales y no puede ser controlada, obteniéndose un producto seco de baja calidad [3].

En general, las grandes industrias dedicadas al deshidratado, consumen demasiada energía en el proceso intensivo; por lo tanto,

tienen que invertir mucho dinero porque el combustible principal es el gas LP o gas butano [4], además de esto, la escasez de combustibles fósiles aumentó el interés en el uso de la energía solar como fuente de energía alternativa para el proceso de deshidratación de productos agrícolas [5].

El requerimiento de energía para deshidratado, puede determinarse a partir del contenido de humedad inicial y final de producto [1]. Este tipo de sistemas requiere temperaturas de funcionamiento de vapor en los intercambiadores de calor por encima de 130 °C, porque la temperatura del aire de entrada al sistema de secado está en un intervalo de 70 y 90 °C, intervalo que depende de la temperatura requerida por el producto a deshidratar en el interior del túnel de convección [6]. Para reducir el costo de producción y la dependencia de combustible fósil del proceso de deshidratado, el uso de secadores solares puede proporcionar una alternativa muy necesaria apropiada para el secado de algunos de los productos agrícolas en los países en desarrollo [6].

En ese sentido, los sistemas de concentración solar han aumentado en los últimos años y se han desarrollado diferentes tipos de dispositivos cuyas aplicaciones requieren materiales con una alta reflectancia solar para que puedan ser considerados en su fabricación para conseguir eficiencias de conversión aceptable, esta eficiencia depende del material reflectante usado. Una amplia variedad de espejos ya han sido estudiados y usados para la elaboración de colectores cilindro-parabólicos (CCP) logrando resultados sobresalientes [7]. Así, los materiales tales como espejos de plata o de aluminio se utilizan debido a sus excelentes propiedades de reflexión especular de la radiación solar. La reflectividad de los materiales comúnmente usados en captadores solares varía de 0.89 a 0.95 [8]. Sin embargo, los costos de manufactura son elevados, debido a los tratamientos que se les debe dar para su durabilidad, ocasionando que estén al alcance de un mercado muy limitado. Sin embargo, el acero inoxidable, ofrece una alternativa para que potencialmente pueda utilizarse como reflector en CCPs debido a su bajo costo y fácil adquisición en el mercado. El acero inoxidable presenta un aumento en la reflectancia a lo largo del espectro visible y alcanza un valor de 0.40 (para longitudes de onda de 700 nm) en el espectro solar visible, [9], aunque la bibliografía también se encuentra un reporte que se afirma haber obtenido hasta 0.60 en la misma longitud de onda [10].

Es importante mencionar que el acero inoxidable no se ha encontrado de momento con una aplicación para la manufactura de CCPs, ya que como se mencionó antes, los principales materiales reflectantes utilizados para espejos son el aluminio y en algunos casos plata, esto debido a que la principal aplicación de los mismos es para la generación de energía eléctrica y por tanto se requiere una mayor calidad reflectiva. Por tal motivo a través de un proceso de pulido se mejoraron las propiedades reflectantes del acero inoxidable tomando como referencia el AISI 304; se realizaron diferentes niveles de pulido para de esta manera determinar el tratamiento óptimo logrando alcanzar un acabado espejo, con la información obtenida se realizó la simulación de un prototipo de CCP con dicho material en base a la demanda energética del deshidratado, la cual satisface de manera aceptable. Con los resultados se propone un pequeño captador solar modular, que presente una fácil instalación y operación, mínimo mantenimiento, gran durabilidad y bajo costo. Este tipo de captador solar podría ser una alternativa para procesos térmicos cuya demanda de energía es baja y los costos de implementación son más importantes que conseguir una eficiencia de conversión solar-térmica muy elevada.

Finalmente se propone un sistema híbrido compacto de deshidratado, que permita aumentar la rentabilidad y flexibilidad de servicio [11], en el cual la novedad es el uso de captadores de canal

parabólico (también denominados captadores cilindro-parabólicos CCP) de pequeño tamaño y bajo costo, de forma que se reduce el consumo de combustibles fósiles usados típicamente y, así mismo, se contribuye a la no emisión de gases de efecto tipo invernadero durante el proceso de deshidratado.

El sistema, al ser híbrido, funciona alternando la parte convencional, que utiliza como combustible gas LP, con la parte de solar fototérmica. En primera instancia se utiliza la parte convencional, que actúa a manera de reserva en caso que la radiación solar no sea lo suficiente alta para abastecer al sistema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2. MÉTODO DE ENSAYO

Las pruebas que se realizaron al acero inoxidable 304 consistieron en buscar un tratamiento óptimo para lograr la máxima reflectividad del mismo, para lo cual las muestras utilizadas se pulen bajo diferentes condiciones de pulido automático utilizando cuatro tipos diferentes de hojas de pulido. El tiempo de pulido es de 2 minutos por muestra, en cada tipo de lija o paño, según sea el caso, con lo cual se busca mejorar la altura máxima de la rugosidad de la superficie, la media aritmética del perfil de rugosidad (R) y la media aritmética de los valores absolutos de la ordenada sobre la longitud de muestreo (Ra) esto de acuerdo a la ISO 25178 [12]. La fuerza de empuje sobre cada muestra durante el proceso de pulido se mantiene constante a 60 N con una velocidad de giro de 150 rpm, de esta forma se estandarizó el proceso.

El acero inoxidable fue sometido a pruebas de dureza, rugosidad, pulido y finalmente de reflectancia mediante equipo disponible en la *Plataforma Solar de Almería*; para la primera de ellas se realizó utilizando un durómetro modelo Duramin 500, acorde a la ISO 6507-1:2010 sobre dureza [13]. Se realizaron 3 pruebas de dureza, de las cuales se obtuvo un valor promedio de 194 vickers, valor que se encuentra dentro del intervalo reportado por la literatura para este material, la cual menciona que para un inoxidable AISI 304 su dureza es alrededor de 190 vickers. Por otro lado, se realizaron pruebas de pulido al material mencionado bajo diferentes condiciones con la ayuda de una pulidora automática; fueron cuatro tipos diferentes de hojas abrasivas: 1200, Dac, Nap, Chem, los cuales son nombres comerciales de las disoluciones y respectivos paños abrasivos, dos de ellas con grano de abrasión para lijado de mayor a menor escala, logrando así la disminución de la rugosidad, finalmente, dos restantes son paños de pulido con abrasivos suaves, las cuales permiten obtener el acabado espejo requerido para considerarlo útil en la aplicación buscada.

Una vez que las muestras son pulidas, se realizan medidas de la rugosidad superficial bajo la norma ISO 25178 [12], con objeto de determinar si este proceso influye o no en la reflectancia del acero. El instrumento con el que se realizó esta prueba, fue un microscopio modelo 3D *Leica DCM3D*, que cuenta con un sistema con tecnología de doble núcleo diseñado para la evaluación rápida, no



Fig. 1: Muestras de acero inoxidable antes y después del tratamiento de pulido

invasiva de las estructuras micro y nano de superficies técnicas, en múltiples configuraciones. Finalmente, la medida de reflectancia de las distintas muestras de material preparadas se llevó a cabo mediante el uso de un espectrofotómetro (Perkin Elmer Lambda), diseñado para lograr un mayor nivel de sensibilidad, resolución y velocidad, el resultado final del pulido se muestra en la Figura 1.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE MEJORA DEL ACERO INOXIDABLE A TRAVÉS DEL PROCESO COMO MATERIAL REFLECTANTE

La finalidad del ensayo mencionado, es mejorar las características reflectivas del acero inoxidable y proponer un CCP de acero inoxidable, el cual se denominó MEXSOL, tomando como base los parámetros del captador solar modelo CAPSOL el cual previamente fue investigado y desarrollado en la Plataforma Solar de Almería (PSA) [14], siendo las principales diferencias entre los dos

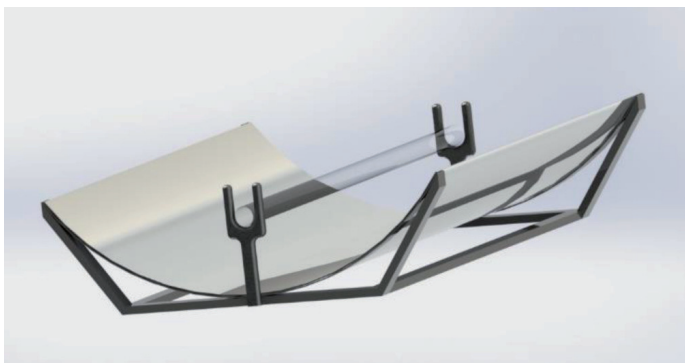


Fig. 2: Propuesta de CCP MEXSOL

captadores las relativas al costo, dimensiones y tipo de material reflectante.

Para el captador MEXSOL, se tomaron en cuenta las características del material (acero inoxidable) y la geometría del diseño de captador solar, la Tabla 1 muestra los parámetros del CCP de acero inoxidable propuesto.

Parámetros	Valor
Apertura (m)	1,05
Longitud (m)	3
Distancia Focal (m)	0,2
Ángulo de Apertura (grados)	96,7
Ángulo de aceptación (grados)	2,5
Diámetro exterior del absorbedor (mm)	25
Proporción de concentración geométrica	14,4

Tabla 1: Parámetros del captador solar MEXSOL

$$P_{Q,fluid} = A_c * DNI * \cos(\theta) * \eta_{opt,0^\circ} * K(\theta) * F_c - P_{Q,loss}$$

Donde:

$P_{0.fluid}$ Eficiencia térmica del termofluido

A_c Área del Colector

DNI Irradiancia normal directa

 $\cos(\phi)$ Coseno del ángulo de incidencia $\eta_{opt,0^\circ}$ Eficiencia óptica del colector

$K(\theta)$ Modificador de ángulo de incidencia

F_C	Factor de limpieza
-------	--------------------

$P_{0,loss}$ Pérdida de calor

$P_{0,sol}$ Captación total solar

Básicamente, el rendimiento térmico de un colector cilindro-parabólicos se calcula como.

La salida térmica de un colector CCP depende de la entrada de energía, es decir, la captación total solar $P_{Q'Sol}$ y de la pérdida de calor $P_{Q'loss}$. La primera depende de la irradiancia solar directa (DNI), el área del colector A_c , la máxima eficiencia óptica de la $\eta_{opt,0^\circ}$ el coseno del ángulo de incidencia θ , el modificador de ángulo de incidencia $K(\theta)$, y el factor de limpieza del colector F_c . Las siguientes expresiones se derivan de la similitud dimensional del captador propuesto con el tipo CAPSOL, ya que son muy similares, su principal diferencia está en el material reflectante (acero inoxidable en vez de aluminio), en ese sentido se tiene que el rendimiento global teórico del captador solar diseñado está dado por la Ec. (2):

$$\eta_{global} = 0.55 - 1.1 \frac{\Delta T}{DNI} - 0.014 \frac{\Delta T^2}{DNI} \quad (2)$$

Dónde ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura media del fluido en el tubo receptor del captador y la temperatura ambiente (en $^{\circ}\text{C}$) y DNI es la irradiancia directa normal (en W/m^2). La Ec. (1) es válida para ángulos de incidencia de la radiación solar igual a cero grados. Para otros ángulos de incidencia es necesario incluir en la expresión el efecto del ángulo de incidencia a través del parámetro denominado modificador por ángulo de incidencia $K(\theta)$ [14]. Se consideraron también el modificador de ángulo de incidencia:

$$K(\theta) = 1 + 2.2 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 1.65 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 \quad (3)$$

En la Ec. (3) θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar (en grados) que se obtiene con la radiación solar directa y el vector normal al plano de la abertura del CCP, debido a que es de suma importancia analizar en detalle la influencia en el factor de interceptación de errores de seguimiento o de desalineación del reflector [15]. Como la geometría del captador solar propuesto es similar a la geometría CAPSOL, se ha concluido a partir de un estudio preliminar numérico que esta correlación sería también válida para el captador propuesto, pero debe ser contrastada con los resultados experimentales que se obtengan cuando se realice la experimentación del primer prototipo de este captador solar.

A partir de lo anterior se desarrolló un modelo de dimensionado energético para analizar la eficiencia y la producción de energía térmica anual de un campo solar utilizando el CCP MEXSOL, los cálculos fueron realizados mediante *Matlab Environment*®. El modelo permite calcular el comportamiento térmico de un campo solar en condiciones ambientales variables, logrando alcanzar temperaturas por encima de 150 °C, valor que cumple con los requisitos de procesos térmicos de bajo requerimiento energético.

2.4. COMPARATIVO DEL CCP MEXSOL VS OTROS

Se analizaron otros tipos de CCP encontrados en la literatura y en el mercado tomando en cuenta sus parámetros, los cuales fueron diseñados para otras aplicaciones industriales o para la generación de electricidad, estos CCP se describen a continuación:

1. CAPSOL mencionado anteriormente. Cuenta con una superficie de 2 m², su foco es un tubo receptor que está al vacío con una cubierta de cristal lo cual reduce pérdidas de calor, además, mejora la estabilidad estructural, simplifica y reduce el mantenimiento y las operaciones de limpieza, al tiempo que protege el resto de los componentes de la intemperie, lo que aumenta su durabilidad [14].

2. PolyTrough 1200 fabricado y suministrado por la empresa Solar NEP [16]. Éste también de dimensiones pequeñas, el cual fue desarrollado para un alto rendimiento de hasta 230 °C; tiene la característica que es de fácil instalación; las configuraciones son flexibles. El material reflector en este diseño del colector es de aluminio y utiliza un tubo receptor al vacío al igual que CAPSOL.
3. Colector parabólico compuesto (CPC) que permite un ángulo de aceptación grande y necesita ajustes de inclinación sólo de vez en cuando en lugar de seguimiento solar continuo. Por lo tanto, se ha encontrado útil en muchas aplicaciones de baja concentración, donde la facilidad de manejo y bajo costo son criterios importantes [17].
4. CCP desarrollado y propuesto por la UNAM, en México, con el objetivo de ser utilizado para la generación directa de vapor (GDV) con agua y vapor a baja entalpía, el material reflectante utilizado en este caso fue aluminio, el foco utilizado es de acero inoxidable recubierto con pintura negro mate, finalmente presenta una cubierta de vidrio que cubre toda la apertura del colector [18].

Los parámetros geométricos principales para cada uno de estos colectores se muestran en la Tabla 2.

	CCP MEXSOL	CCP 1	CCP 2	CPC 3	CCP 4
Área del colector (m ²)	3	2	2.88	5.88	2.56
Ángulo de aceptación (°)	2.4	2	1.1	3	2.7
Diámetro del foco (mm)	0.022	0.015	0.025	0.048	0.024
Eficiencia óptica pico (-)	0.55	0.64	0.66	0.55	0.75
Modificador de ángulo de incidencia *	0.96	0.96	0.94	0.91	0.95
* Valores calculados en el punto de diseño					

Tabla 2: Parámetros principales del CCP propuesto así como los encontrados en la literatura

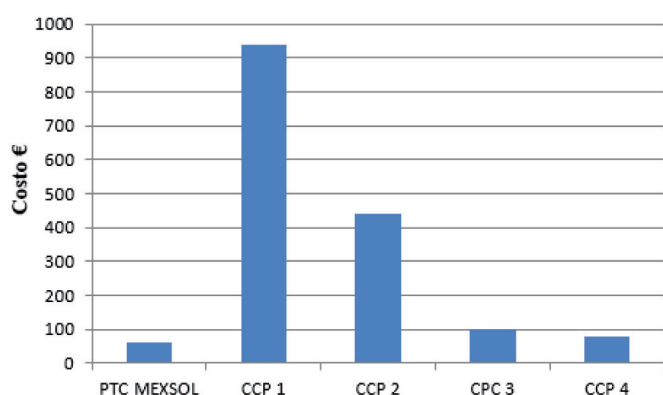


Fig. 3: Costo por unidad de cada CCP

Los costos por m² para el caso de CCP 1 y CCP 2 son bastante elevados debido al tratamiento que se le da al espejo [19], para el caso de MEXSOL así como el CPC 3 y CCP 4, los costos fueron estimados en base a la materia prima requerida [17,18], ya que no

son de uso comercial, la Figura 3 muestra el comportamiento de dichos costos en €, el CCP MEXSOL en este sentido, muestra una buena alternativa.

Se han realizado pre-diseños de campos solares que utilizan todos estos diferentes tipos de colectores mediante el modelo de dimensionado desarrollado. Los detalles de los diferentes diseños y resultados de las simulaciones realizadas se presentan en la siguiente sección.

2.5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESHIDRATADO

Una vez que se cuenta con los conocimientos técnicos del acero inoxidable, se determina la demanda energética del proceso que se caracteriza, se toma como caso de estudio el deshidratado de chile y así, realizar el dimensionamiento del sistema térmico que irá en proporción a la demanda energética del proceso requerido, en este caso deshidratado de chile. Los requerimientos energéticos se muestran en la Tabla 3:

Tiempo promedio de deshidratado	Cantidad de gas LP requerido	Calor específico del gas LP	Total de demanda energética requerida
36 h	1512 Lt	12.83 kWh/kg	10898.3 kWh

Tabla 3: Demanda energética requerida para deshidratar 8 Ton. de chile en base a gas LP

El costo promedio del gas LP en México es 13.70 pesos por litro para el estado de Zacatecas [20], lo que hace un total de 2589.3 pesos por tonelada, lo que equivale aproximadamente a 150 euros, tomando en cuenta que el cambio del peso frente al euro es de \$17 en el mes de febrero 2015, teniendo en cuenta el cambio de moneda actual.

Las características de este sistema se pueden agrupar en tres etapas principales:

Primera etapa: Parte convencional del sistema híbrido de deshidratado

Esta parte del sistema consta de una cisterna de agua que provee a una caldera, donde se convierte dicho líquido en vapor mediante algún combustible fósil, como puede ser gas LP, el cual está almacenado en un tanque auxiliar de combustible. El vapor de agua se lleva hasta un pequeño túnel de generación de calor a una temperatura promedio 120 °C, llegando directamente a un radiador de agua en el cual se enfría y se condensado, para retornar nuevamente a la caldera.

Segunda Etapa: Parte solar fototérmica del sistema híbrido de deshidratado.

Consta de un sistema solar fototérmico constituido por CCPs, los cuales están formados por módulos que utilizan una estructura reflectora de sección parabólica, esta superficie como ya se ha mencionado es de acero inoxidable y cuyas dimensiones son 1,05 m de abertura por 3 m de longitud. Debido a las propiedades reflectoras de las parábolas, los CCPs concentran los rayos solares reflejados en el foco, donde se sitúa un tubo receptor fabricado con material metálico, en el diseño propuesto el material es cobre reforzado con la finalidad de evitar fugas debido a las altas presiones y altas temperaturas del termofluido que circulará a través del mismo. El termofluido (agua), conforme pasa a través de los CCPs, gana temperatura, la cual es disipada al llegar al túnel de generación de calor, llegando directamente a un radiador de agua.

Tercera Etapa: Convergencia y Automatización

Cuando la primera y segunda etapa convergen, se utiliza un control proporcional, que tiene como función regular la velocidad

	PTC MEXSOL	CCP 1	CCP 2	CPC 3	CCP 4
Pérdida de calor (kW)*	0.2255	0.2255	0.2242	1.3889	0.3436
PQSol (kW)*	2.6045	1.7363	2.0836	2.6045	2.1183
PQ _{fluid} (kW)*	1.19	0.8353	1.0645	0.8156	1.1505
Velocidad del Fluido (m/s)	1.16	1.42	1.02	0.42	1.06
Flujo Másico (kg/s)	0.3314	0.27	0.2333	0.1215	0.2471
Incremento de Temperatura (K)*	0.82	0.74	1.08	1.4	1.1
Número de colectores por fila	36	40	28	18	28
Número de filas	22	26	34	64	30
Área (m ²)	2376	2340	2742	6912	2150

Tabla 4: Resultados térmicos del MEXSOL vs los CCPs encontrados en la literatura

*Estos datos son por cada unidad de colector

del extractor de aire, y es controlado por un sensor de temperatura tipo T o J que se programa para registrar la temperatura de salida de la parte convencional y fototérmica, dando prioridad a la utilización de la segunda, de manera tal que llegue un punto en que el proceso de deshidratado sea totalmente independiente de la etapa convencional. El sistema de control manipula de forma automática la velocidad de dicho extractor para que enfíe y regule proporcionalmente la temperatura en base a las necesidades requeridas dentro del túnel de deshidratado.

En la parte interior del túnel de deshidratado se introducen las rejillas con el producto, chile para este caso de estudio. El tiempo de secado puede ser de 34 a 36 h por rejilla, posterior a dicho tiempo, se va retirando una rejilla cada dos horas de dicho túnel con el producto ya deshidratado. El proceso de deshidratado es por lotes (tipo *batch*), la Figura 4 muestra lo descrito.

3. RESULTADOS

Como resultado de las pruebas de pulido realizadas al acero inoxidable AISI 304, se midió la reflectancia de 7 muestras y se comprobó cómo esta magnitud se relaciona directamente con la rugosidad de la superficie. La Figura 5 presenta el valor que toman

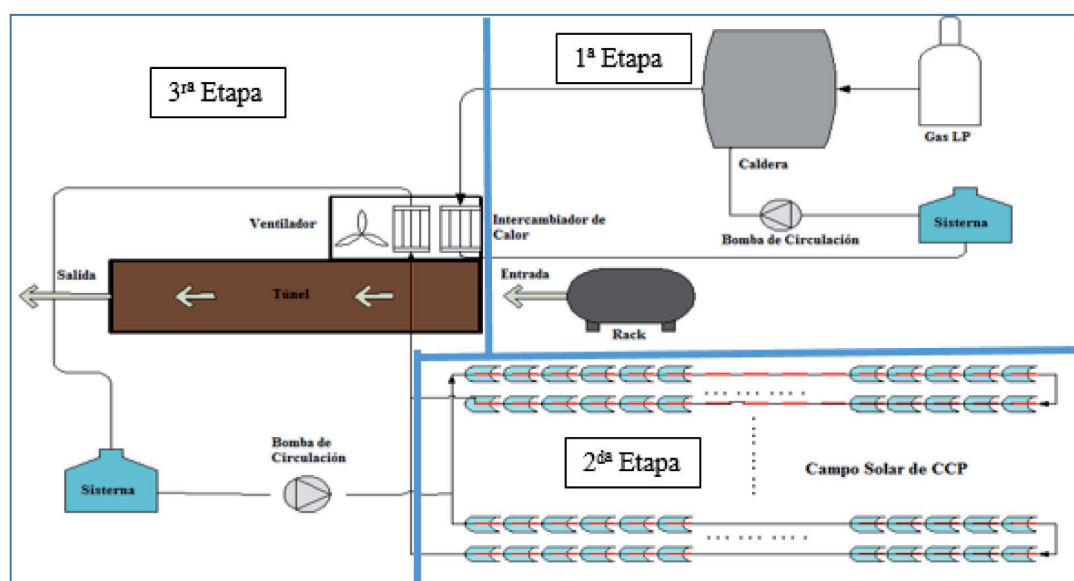
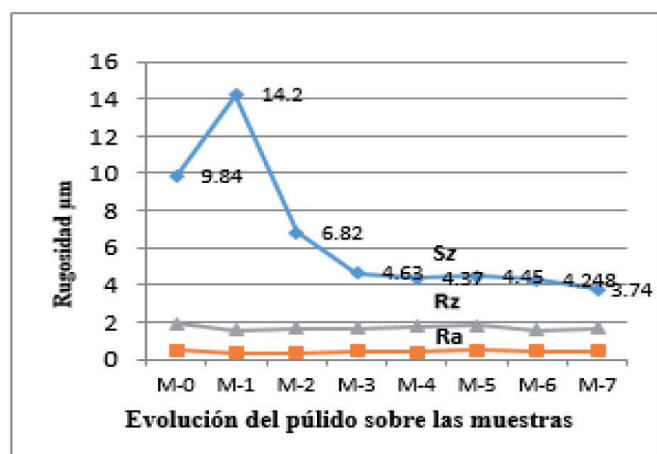
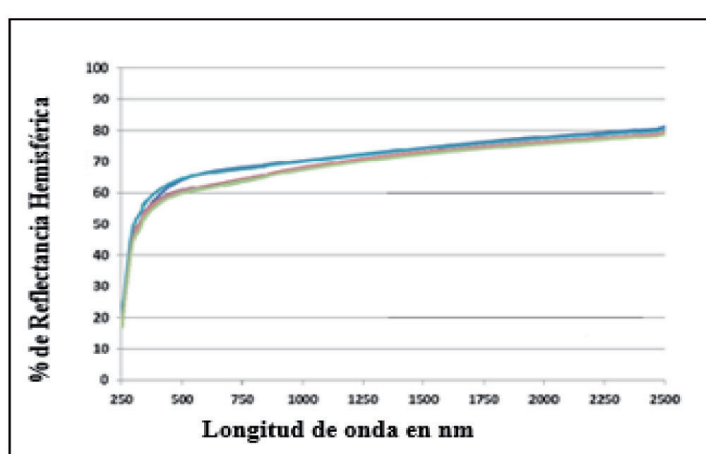


Fig. 4: Sistema híbrido propuesto



a



b

Fig. 5: Comportamiento de muestras de acero inoxidable con diferentes tratamientos de pulido (a); Reflectancia del acero inoxidable en función de la longitud de onda (intervalo de longitudes de onda del espectro solar) de las últimas cuatro muestras pulidas (b).

diferentes parámetros de interés para este caso como lo es , que es una medida de altura máxima de la rugosidad de una superficie, que muestra la media aritmética de alturas en un perfil de rugosidad y finalmente que muestra la media aritmética de los valores absolutos de la ordenada sobre una longitud de muestreo se obtiene utilizando un microscopio modelo 3D para cada una de estas muestras, estos parámetros resultan de gran importancia ya que al disminuir la rugosidad se logra obtener un acabado espejo y por tanto mejorar la reflectividad del mismo.

La Figura 5 muestra en primera instancia la rugosidad de las diferentes muestras (M-X), donde $X = 0, \dots, 7$, M-0 muestra una menor rugosidad con respecto a la M-2, esto es debido a que fue medida su rugosidad sin ningún tratamiento previo, en tanto que la segunda fue sometida a una hoja abrasiva muy fuerte con lo que en lugar de mejorar se obtuvo una mayor rugosidad. Posterior a esto se observa que va disminuyendo hasta lograr una rugosidad de 3.74 nm en O-7. Como se puede ver los resultados preliminares demuestran el efecto significativo que el pulido de las muestras tiene sobre la reflectancia de las mismas, la cual resultó ser mucho mejor que la reportada en la literatura, ya que se alcanza un promedio de 0,70, valor que se considera suficiente para la utilización de acero inoxidable con acabado pulido espejo en captadores solares CCP como el propuesto en este trabajo.

Por otro lado los resultados obtenidos mediante Matlab Environment® en cuanto al dimensionamiento se muestran en la Tabla 4.

De estos parámetros obtenidos en relación a la eficiencia de los CCPs en primera instancia se analizan los referentes a la captación total solar ($P_{\alpha_{sol}}$), la eficiencia térmica del termofluido ($P_{\alpha_{fluid}}$), así como la pérdida térmica ($P_{\alpha_{loss}}$), esto debido a que involucran implícitamente a los demás parámetros y por tanto determinan la eficiencia térmica útil de los CCPs analizados.

Por otro lado, la Figura 6 muestra la cantidad de colectores y filas necesarias para el deshidratado acorde a la demanda energética determinada en el dimensionamiento del sistema, en este caso para el deshidratado de Chile.

Con los resultados obtenidos en la Figura 6 en relación a MEX-SOL, se puede determinar el impacto económico y ambiental logrado con el sistema propuesto, además del total de combustible fósil (gas LP) requerido para deshidratar desde 1 kg hasta 1 túnel completo de Chile, cuyo volumen total son 8 Ton, estos valores son aproximados tomando en cuenta que las cantidades varían en razón del tipo de producto que se esté deshidratando; es de resaltar la cantidad del ahorro económico por carga completa de túnel que equivale aproximadamente a \$ 10,000 pesos mexicanos, alrededor de 580 euros; así mismo por cada 8 toneladas deshidratadas se estaría dejando de emitir en promedio 2 Ton de CO₂, sin embargo, es importante mencionar que estos resultados varían dependiendo de la demanda energética requerida, lo anterior se muestra en la Tabla 4.

4. DISCUSIÓN

La propuesta de este trabajo es la utilización de un nuevo material de bajo costo para un sistema de deshidratado mediante un método convencional y de energía solar. Sus propiedades reflectivas son mayores a los 600 nm que es donde las longitudes de onda de absorción del agua están arriba de esta longitud, logrando abastecer la demanda energética. La energía útil de los CCP varía debido a la concentración conseguida en el foco que puede ser aproximadamente 70 veces la intensidad normal del sol, valor que corresponde a la relación de concentración del captador al rendimiento óptico y térmico, además de la variación de tamaño entre

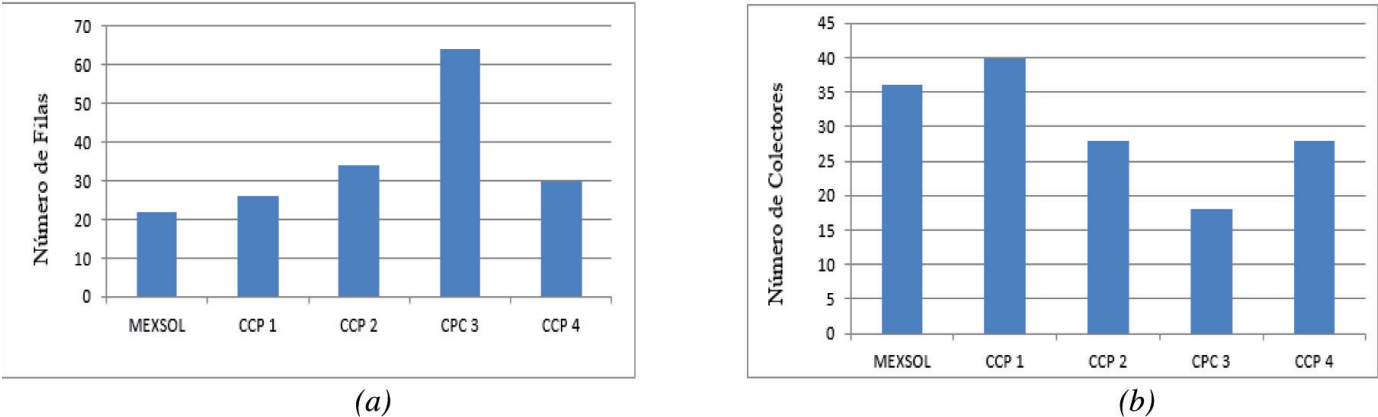


Fig. 6: Número de colectores por fila (a); número de filas requeridas para satisfacer la demanda energética del deshidratado de Chile (b)

Cantidad	Chile en Kg	Lt de Gas L.P.	Ton de CO ₂ liberados con Gas L.P.	Ton de CO ₂ liberados con CCPs	Costo del deshidratado mediante combustible fósil	Costo del deshidratado mediante CCPs	Diferencia
1 kg	1	0.189	0.00031	1.03E-4	\$1.99	\$0.66	\$1.33
1 Tonelada	1000	189	0.0318	.0106	\$2092.23	\$697.41	\$1394.82
1 Túnel Completo	8000	1512	3	1	\$15038.60	\$5012.87	\$10025.73

Tabla 4: Reducción de costos y mejora ambiental lograda con el sistema propuesto.

cada CCP, sin embargo, los costos de adquisición de los CCPs son elevados, motivo por el cual se está proponiendo la manufactura de un CCP denominado MEXSOL que ofrece un menor costo, en relación a sus competidores, sobre todo el CCP 1 y CCP 2, que son distribuidos comercialmente y su costo por unidad es hasta un 80% menor y puede satisfacer la demanda energética de diferentes procesos que no requieren más allá de 150 °C como es el caso del deshidratado entre otros sectores industriales.

5. CONCLUSIONES

El trabajo propuesto describe la construcción de un sistema híbrido de deshidratado con aplicación de energía solar mediante colectores cilindro-parabólicos cuya principal aportación respecto a sus antecesores radica en la utilización de acero inoxidable como material espejo, esto se logra a través de un proceso de pulido estandarizado con lo que se disminuye la altura máxima de la rugosidad de la superficie considerablemente, alcanzando así una reflectividad promedio de 0.70, suficiente para satisfacer la demanda energética del proceso de deshidratado, cabe resaltar que dicho material es de fácil manejo, mayor dureza, fácil adquisición en el mercado y un costo muy competente en relación a sus antecesores.

Por tanto, el sistema se conforma por un sistema convencional que utiliza combustible fósil, un túnel de deshidratado en donde se alcanzan temperaturas que van desde los 70 °C a 90 °C, dependiendo del tipo de producto que se desee deshidratar y un campo solar de colectores cilindro-parabólicos. Las ventajas principales de este sistema respecto a otros, es que tiene una reducción de costos, aproximadamente un 40 %, además de eso, se logra una disminución de emisión de gases tipo invernadero, esto sin dejar de remarcar que puede deshidratar gran volumen de producto en comparación con otros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kandpal TC, Purohit P, Kumar A. Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation. *Solar Energy* 2006;80:1568-1579. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.12.009>
- [2] Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:1-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ser.2009.07.032>
- [3] Hossain MA, Woods JL, Bala BK. Optimisation of solar tunnel drier for drying of chili without color loss. *Renewable Energy* 2005;30:729-742.
- [4] Okoro OI, Madueme TC. Solar energy investments in a developing economy. *Renewable Energy* 2004;29:1599-1610.
- [5] Mulhbauser W. Present status of solar crop drying. *Energy in Agriculture* 1986;5: 121-137.
- [6] Hernández RJ, Martínez VO, Quinto DP, Cuevas DJ, Acosta OR, Aguilar JO. Secado de chile habanero con energía Solar. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 2010;10:120-127.
- [7] SALBIDEGUITIA-GARCIA, Ibon Beñat. *SOLAR ENERGY*. DYNA, Diciembre 2008, vol. 83, no. 9, p.561-566
- [8] Fernández-García A, Zarza E, Valenzuela L, Pérez M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14: 1695-1721. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>
- [8] Castelli RA, Persans PD, Strohmayer W, Parkinson V. Optical reflection spectroscopy of thick corrosion layers on 304 stainless steel. *Corrosion Science* 2007; 49:4396-4414.
- [9] Echazú R, Cadena C, Saravia L. Estudio de Materiales Reflectivos para Concentradores Solares, AVERMA 2000, 08-11.
- [10] OkicćM, Roušar I, Táborský Z, Roháček K. (1987). Reflectivity and surface composition of electrochemically and mechanically polished stainless steel. *Materials Chemistry and Physics* 17(3), 301-309. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584\(87\)90152-0](http://dx.doi.org/10.1016/0254-0584(87)90152-0)
- [11] Ruiz-Hernández V, Blanco-Muriel M, Delgado-Noriega J.L, Regueira J.F.

INSTALACION ENERGETICA OPTIMIZADA SOL-GAS . DYNA, Octubre 1994, vol. 69, no. 7, p.20-21

- [12] ISO 25178 Norma oficial para textura de superficies.
- [13] ISO 6507-1:2010 Norma oficial para dureza específica en Vickers de tres diferentes distancias para materiales metálicos.
- [14] Fernández-García A, Zarza E, Valenzuela L, Pérez M, Valcárcel E, Rojas E. Development of a small-sized parabolic trough collector. Final Capsol project results. ISES Solar World Congress 2011, Kassel, Germany 2525-2535.
- [15] Sierra-Velasco, Jose Manuel, Cortizo-Rodríguez, José Luis, Noriega-González, Álvaro et al. IN SEARCH OF FEASIBILITY THERMAL ENERGY USING PARABOLIC TROUGH DESIGN.. DYNA, Diciembre 2011, vol. 86, no. 6, p.662-670. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4160>
- [16] NEPSOLAR, 2013. <http://www.nep-solar.com/>
- [17] Jadhav AS, Gudekar AS, Patil RG, Kale DM, Panse SV, Joshi JB. Performance analysis of a novel and cost effective CPC system. *Energy Conversion and Management* 2013;66:56-65.
- [18] Vidriales L. Colector de canal parabólico para generación directa de vapor para calor de proceso, Maestro en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) 2007.
- [19] Fernández-García, A., Zarza Moya, E, Pérez García, M, Manzano Agugliaro, F.R. Optimización de herramientas para el diseño y la evaluación de captadores solares cilindro-parabólicos para el suministro de energía térmica a temperaturas inferiores a 250 °C. Aplicación práctica al prototipo CAPSOL. Ed. CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-699-8. Madrid, 2013.
- [20] Asociación Mexicana de Gas (AMEXGAS) sitio web: <http://amexgas.com.mx/>

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC, A.C.), y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado así como a la Plataforma Solar de Almería (perteneciente al CIEMAT) España.