

# Ajuste de un concentrador solar de canal parabólico a partir de su reconstrucción geométrica

### Resumen

Se presenta el ajuste de un concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP) construido en la Universidad del Istmo campus Tehuantepec en función de su reconstrucción geométrica. La geometría del colector solar es modelada mediante el ajuste de los datos obtenidos con la técnica de luz estructurada con el método de Levenberg-Marquardt a una ecuación de una sección cónica. El objetivo principal fue el determinar el foco real y diámetro mínimo del receptor (factores que afectan la capacidad térmica del concentrador) de un CCP de 1250 mm de longitud en su apertura y 1000 mm de longitud de canal. El perfil parabólico obtenido permite obtener los parámetros ( $X_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ ) para calcular el diámetro mínimo del tubo receptor.

### Abstract

This paper presents the parametric optimization of a parabolic trough solar concentrator (PTC) built at the Universidad del Istmo, Tehuantepec Campus, based on its geometric reconstruction. The geometry of the solar collector is modeled by adjusting the data obtained by the structured light technique with the Levenberg-Marquardt method to a conic section equation. The main objective was to determine the real focus and minimum diameter of the receiver (factors affecting the thermal capacity of the hub) of a PTC of 1250 mm in length at the opening and 1000 mm in channel length. The parabolic profile yields parameters ( $X_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ ) to calculate the minimum diameter of the receiver tube.

### Résumé

On présente l'ajustement d'un concentrateur solaire cylindre parabolique (CCP) construit à l'Université de l'isthme, campus Tehuantepec, en fonction de sa reconstruction géométrique. La géométrie du collecteur solaire est dessinée selon l'ajustement des données obtenues avec la technique de lumière structurée et avec la méthode Levenberg-Marquardt à une équation de section conique. L'objectif principal a été de déterminer le foyer réel et le diamètre minimum du récepteur (facteurs qui affectent la capacité thermique du concentrateur) d'un CCP de 1250 mm de longueur d'ouverture et de 1000 mm de longueur de canal. Le profil parabolique obtenu permet d'obtenir les paramètres ( $X_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ ) pour calculer le diamètre minimum du tube récepteur.

Alfonso Flores Meza, Víctor Iván Moreno Oliva, Jonatán O. Ocampo Chávez, Lizbeth Contreras Romero

**Palabras clave:** Concentrador solar, óptica geométrica, diámetro mínimo, ajuste de datos.

## 1. Introducción

México tiene un enorme potencial en el desarrollo de la energía solar, para la República Mexicana se reportan valores de radiación solar en el rango de 4 a 5.9 kW h/m<sup>2</sup>, específicamente para la región del Istmo de Tehuantepec se reporta una radiación solar promedio de 5.2 kW h/m<sup>2</sup> llegando a sus máximos valores de 6.6 kW h/m<sup>2</sup> en los meses de marzo y Abril (Almanza, 1999); está puede ser aprovechada de muchas formas, la más desarrollada es la concentración solar. Los colectores de radiación solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía captada de la irradiancia solar en energía interna, misma que es transferida a un medio de transporte (por lo general agua, aceite o aire) que fluye a través del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.3 y 3  $\mu\text{m}$  del rango total

Universidad del Istmo, campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

visible) y es por naturaleza variable con la hora del día (Cengel 2007, Echeverría 2011). Esta tecnología no es nueva, por ejemplo en el año 212 A.C. el científico griego Arquímedes desarrolló un método para quemar las naves romanas en el mar. Esto consistió en construir un gran espejo cóncavo con cientos de escudos pulidos y concentrar los rayos reflejados en cada nave. Durante el siglo XVIII, se construyeron hornos solares para fundir acero, cobre y otros metales. Su uso se extendió en Europa y el Medio Oriente, destacándose un horno diseñado por el científico francés A. Lavoisier que alcanzó la temperatura de 1750 °C (Duffie 1991). En 1907 se patentó por primera vez en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos, por Dr. Wilhelm Maier y Adolf Remshardt (Kalogirou 2004).

Entre las tecnologías de concentración (Jiménez 2005), el CCP (ver Figura 1) permite obtener temperaturas por encima de los 300°C y pueden enfocarse a procesos industriales como el secado o precalentamientos entre otros (Echeverría 2001, Kalogirou 2004, Odeh 1998, Geyer 2003, Cohen 1993, Pillatowsky 2009). Los CCP son concentradores de foco lineal, se caracterizan por tener una superficie reflectora cuya sección transversal corresponde a la de un canal de forma parabólica y un receptor lineal que corre a lo largo de dicha superficie.

### 1.1 Pérdidas globales de energía en el CCP

Cuando la radiación solar alcanza la superficie de un colector parabólico, se pierde una cantidad importante de ella debido a diferentes factores. El total de las pérdidas se puede dividir en tres grupos: pérdidas ópticas, son debidas a que los propios elementos del colector no son perfectos, estas imperfecciones pro-

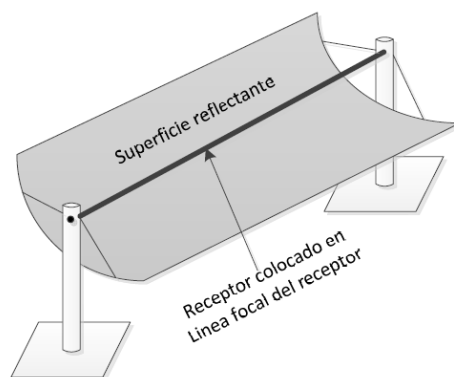


Figura 1. Concentrador de canal parabólico.

vocan que sólo una parte de la radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el tubo receptor. Las pérdidas térmicas están formadas por pérdidas por conducción, convección y radiación que experimenta el tubo receptor y su entorno (Duffie 1991). Las pérdidas geométricas provocan la disminución del área efectiva de captación solar del CCP y se debe principalmente a la inadecuada posición relativa del sistema colector que se refleja en su ángulo de incidencia (Romero 2007).

Uno de los problemas más interesantes en la optimización estructural es la optimización de forma. La pregunta fundamental en estos problemas es ¿cuál es la forma que debe tener una estructura bajo ciertas condiciones de operación para considerarse óptima? Para responder esta pregunta lo primero que se debe contestar es: ¿cuáles son las variables de diseño de las que depende la geometría de una estructura?

### 1.2 Técnica de proyección de luz estructurada

La técnica de proyección de luz estructurada se basa en el método de triangulación láser, para la cual se utiliza la proyección de una línea de luz láser sobre la superficie a evaluar, una cámara perpendicular a un plano de referencia y el objeto de estudio. La técnica consiste en asociar los desplazamientos laterales de la línea láser, observados por la cámara con los cambios de altura del objeto respecto al plano de referencia, a partir de un modelo matemático (Moreno 2014). Para conseguir una reconstrucción digital del objeto completo se realiza un barrido o escaneo de la línea proyectada sobre el objeto de prueba. Esta técnica puede aplicarse a la mejora en los procesos de manufactura de sistemas de concentración solar (Moreno 2014).

### 1.3 Cálculo del diámetro mínimo del tubo receptor

El Sol no es una fuente solar luminosa puntual visto desde la superficie de la Tierra, el disco solar que conforma corresponde a un ángulo de apertura de 32', por tanto la radiación solar directa sobre la superficie terrestre no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semiángulo igual a 16' alrededor de

la línea que une el punto de observación con el centro del disco solar. Así, no todos los rayos de este cono alcanzan un receptor de tamaño arbitrario (Paredes 2012). El valor del diámetro mínimo ( $\varnothing_{\min}$ ) que debe tener el tubo receptor depende principalmente de la distancia focal a través del valor de  $\rho$  (ver Figura 2). La determinación del foco y del diámetro mínimo es determinada normalmente de los datos de diseño

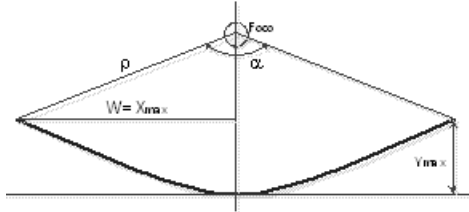


Figura 2. Esquema de las relaciones y distancias dentro del perfil del ccp.

teórico, sin embargo no son tomadas en cuentas las imperfecciones de la superficie así como los errores cometidos en la manufactura del mismo, presentándose desviaciones tanto del foco, ángulo de apertura  $\alpha$  y distancia  $\rho$ . Es por ello que en el presente trabajo se desarrolla el ajuste y por ende optimización del colector solar mediante el uso de las medidas obtenidas a partir de la reconstrucción geométrica de la superficie del CCP.

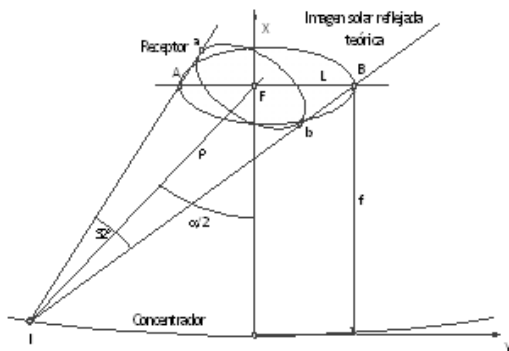


Figura 3. Proyección del disco solar sobre el absorbedor.

Las ecuaciones para la determinación del diámetro mínimo son como sigue:

$$\tan(\alpha/2) = x_{\max} / (F - y_{\max}) \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{(W^2 + (F - y_{\max})^2)} \quad (2)$$

$$\varnothing_{\min} = (2 * \rho * \tan 16) / (\cos \alpha/2) \quad (3)$$

## 2. Desarrollo

### 2.1 Descripción del CCP estudiado

Se trabajó con un prototipo de concentrador construido en la universidad del Istmo que presentaba una

distancia focal teórica de diseño de 500 mm, una apertura de 1250 mm y una longitud de canal de 1000 mm.



Figura 4. Prototipo de ccp.

El CCP de acrilato de metilo con acabado espejo (reflectividad de 0.82) cuenta con un mecanismo que es un juego de poleas que mediante una banda transmite el giro del motor a pasos NEMA HT34-506 de la empresa Applied Motion Products de  $1.8^\circ$  por paso al tubo de soporte del colector, haciendo posible mediante una secuencia de pulsos el seguimiento solar del colector en el ángulo azimutal, de forma tal que los rayos solares inciden sobre éste lo más perpendicular posible a su superficie; también cuenta con una base mecánica que permite al concentrador seguir la altura angular aparente del Sol.



Figura 5. Mecanismos para seguimiento de altura angular y ángulo azimut

### 2.2 Caracterización geométrica de la superficie reflectora

Se empleó un sistema óptico: Cámara Canon Mod. DS126291, Taiwán, un láser de estado sólido clase III, (532 nm, < 50 mW) Taiwán y un tripie con motor a pasos de barrido angular para evaluar la superficie reflectora.

Procedimiento: 1. El sistema óptico se colocó de manera tal que el campo de visión de la cámara cubriera en su totalidad el área del objeto a evaluar. 2. Después se proyectó la línea láser sobre el plano de referencia

y la cámara observó la línea recta de la proyección al centro de la imagen, donde la coordenada en x es tomada como posición de referencia. 3. Se colocó el objeto de prueba sobre el plano de referencia y se realizó un barrido angular en la dirección ortogonal al desplazamiento del instrumento. El motor empleado para el barrido angular gira 1.8° por cada paso, generando una distancia media de 66 mm entre cada proyección sobre la superficie y los cambios de la posición de la línea se observaron con la cámara (Moreno 2014).

El procedimiento usado para la prueba es similar al usado en el trabajo de Moreno (2014), con la variante que el escaneo del láser se realiza angularmente, rotando el láser por medio de un motor a pasos. Para el ajuste se empleó el toolbox de ajuste de Matlab con el método de Levenberg-Marquardt.

### 3.Resultados

Se empleó el software Matlab con el método Levenberg-Marquardt (Henry 2003), lo que permitió ajustar los puntos obtenidos a la ecuación de una sección cónica dada por:

$$f(x, y) = p00 + p10 \cdot x + p01 \cdot y + p11 \cdot x \cdot y + p02 \cdot y^2 \quad (4)$$

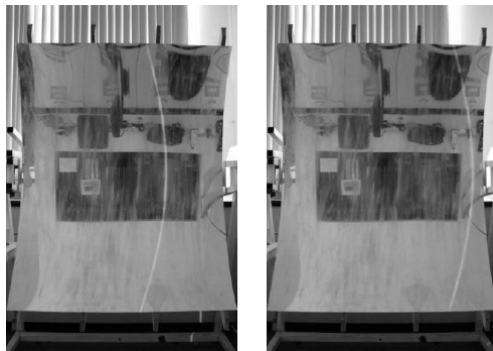


Figura 6. Perfiles del CCP y la proyección de la línea láser sobre su superficie.

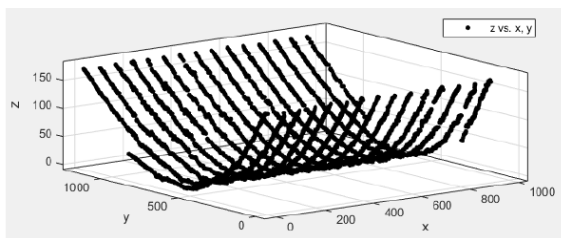


Figura 7. Perfil para la reconstrucción digital de la superficie del ccp.

Los coeficientes encontrados de la superficie que mejor se aproxima a este conjunto de puntos con un criterio de ajuste R2 del 99.48%, fueron:

$$p00 = 180, p10 = 8.636e-05, p01 = -0.5875, p11 = -2.97e-06, p02 = 0.0004927$$

En la figura 6 se muestra el CCP y la proyección del láser sobre la superficie para algunos perfiles (16 en total), la potencia del láser usado permite observar por proyección la línea láser sobre la superficie, las mediciones fueron tomadas sin fuentes de luz externas.

En las figuras 7 y 8 se muestra la reconstrucción digital del concentrador de canal parabólico a partir de los datos obtenidos. La sensibilidad con la que se evaluó la calidad de la superficie fue del orden de 0.49mm. En la Figura 9 se puede apreciar la superposición del conjunto de puntos con la superficie, las diferencias entre el ajuste y los datos tienen una desviación media absoluta del orden de 0.71 mm, con un error de ajuste de 2.11 mm.

Estas diferencias se atribuyen al hecho de una inadecuada adaptación y pegado de la superficie reflectora a las costillas que transmiten la forma parabólica, además que el acrilato de metilo con acabado espejo se deforma muy fácilmente al manipularse.

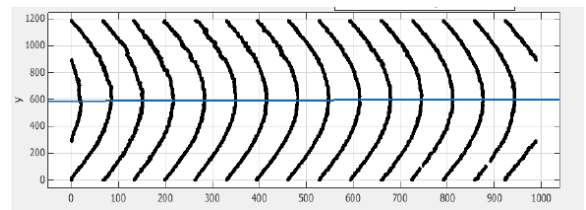


Figura 8. Gráfica del conjunto de puntos evaluados, vista superior.

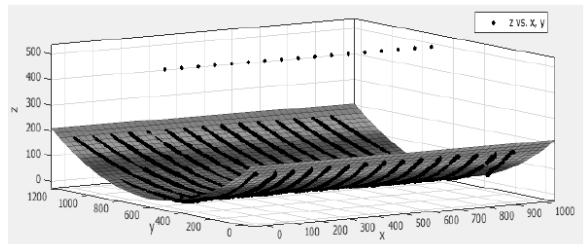


Figura 9. Superposición del conjunto de puntos con la superficie ajustada y foco real.

Pequeñas deformaciones en la superficie de un sistema de concentración influyen en la región de concentración y por consiguiente en su eficiencia. La ventaja e importancia de estos resultados es que permiten conocer el valor real de su distancia focal y saber dónde colocar el absorbedor y su diámetro mínimo de operación. Se obtuvo un perfil parabólico tomando a la variable  $x$  como constante ( $x = 0$ ), obteniendo así la ecuación

$$f(y) = 180 - 0.5875y + 0.0004927y^2 \quad (5)$$

Con la ecuación 4 y realizando cortes sobre el eje  $x$  se obtienen diferentes ecuaciones parabólicas. Analizando los perfiles parabólicos resultantes, se determina el valor de la distancia focal aproximada del CCP. Este valor difiere entre 12.273 mm y 10.650 mm del valor teórico (500 mm), es decir, el valor del foco real medio es del orden de 511.462 mm (Figura 9). La reconstrucción geométrica del canal parabólico da también los parámetros geométricos que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros geométricos obtenidos de la reconstrucción geométrica.

Parámetro	Valor (mm)	Parámetro	Valor (mm)
$X_{\max}$	592.03	Longitud del colector $L_c$	990
$Y_{\max}$	174.10	Apertura $A_p$	1184.07

Empleando las ecuaciones (1-3) se calculó el diámetro mínimo que fue de 12.82 mm para el absorbedor. En base a las especificaciones ASTM-B88 para tubería de cobre tipo M se propuso un diámetro nominal de  $\frac{1}{2}$  pulgada. La Tabla 2 proporciona las características del tubo de cobre propuesto. Con el diámetro del receptor y las dimensiones del canal parabólico se calculó el factor de concentración ( $A_p/\pi \cdot Dt$ ) que es de 23.73 (factor que se encuentra entre los 15 y 40 característicos para este tipo de concentrador).

Tabla 2. Características de la superficie receptora

Dimensiones y propiedades del tubo receptor	
Tipo de material	Cobre
Diámetro exterior $Dt$ [=] m	0.01588
Espesor [=] m	0.00071
Diámetro interior [=] m	0.01446
Longitud [=] m	1
Absorbancia ( $\alpha$ )	0.97
Emisividad ( $\epsilon$ )	0.92
Reflectancia ( $r$ )	0.16
Conductividad térmica $k$ [=] $W/m^{\circ}C$	385

## 4. Conclusiones

Se logró caracterizar el canal parabólico, permitiendo así obtener la línea focal matemáticamente a partir de la ecuación general de la parábola, la variación fue del orden de +11.46 mm, la cual es una distancia significativa comparada con la dimensión del receptor. También proporcionó las variables dimensionales del canal necesarias para su estudio dimensional y calcular el diámetro mínimo del receptor. Cabe mencionar que el diseño teórico de los colectores debe ser sometido a una prueba de calidad para realizar ajustes si es posible a las variables antes mencionadas. Se propone reajustar el proceso de manufactura cuando se presenta un ajuste pobre de los datos **1**

## Bibliografía

- Almanza S., Cajigal R., Barrientos A., Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana; Reportes de insolación de México; Southwest Technology Development Institute; México; 1999.
- Cengel A., Afshin J. G.; Transferencia de calor y masa, fundamentos de termodinámica; Ed. Mc Graw Hill; 4ta edición; México; ISBN: 987-607-15-05408; 2007.
- Cohen G.; Operation and efficiency of large-scale solar thermal power plants; In Proceeding of Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion; SPIE, Vol. 2017, pp. 332-337; 1933.
- Duffie J. A.; Beckman W. A.; Solar Engineering of Thermal Processes; Ed. John Wiley & Sons (2ª Edición); New York, EEUU. ; ISBN: 0-471-22371-9; 1991.
- Echeverría López C. A.; Diseño de un colector cilíndrico parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua; Tesis (Para obtener el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico); Universidad de Pirua; Pirua, Perú; 2011.
- Henri P. G.; The Levenberg-Marquardt method for non-linear least squares curve-fitting problems; Department of Civil and Environmental Engineering; Duke University; 2003.
- Jiménez Zúñiga R. U.; Uso técnico de la energía solar; Tesis (Para obtener el título de Ingeniero Químico); Universidad Nacional Autónoma de México; México; 2005.

- Kalogirou S.; Solar Thermal Collector and Applications; Progress in Energy and Combustion Science; Solar Energy Magazine; Vol. 30; 2004; p 231-295, pp. 231295.
- Michael Geyer, Eckhard Lüpfer, Rafael Osuna, Antonio Esteban, Wolfgang Schiel, Axel Schweitzer, Eduardo Zarza; Eurotrough - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation; 11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power.
- Odeh S., Morrison G., Behnia M.; Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors; Solar Energy Magazine; Vol. 62, No. 6; 1998; p 395406.
- Pillatowsky; La utilización de la energía termosolar en el sector industrial; Escuela de investigación en energía; Temixco: CIE, UNAM; México; 2009.
- Moreno-Oliva, E. Román-Hernández, S.A. Rafael-Esesarte, Rommel García-Hernández. "Prueba de calidad en la superficie reflectora de un concentrador solar de canal parabólico con el uso de luz estructurada", Ciencia UAT, 27(1): 06-10, 2014. ISSN: 2007-7521.
- Paredes Velasco C.; Diseño de un captador cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay; Tesis ( Para obtener el título de Ingeniero Técnico de Minas); Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas; Paraguay; 2012.
- Romero-Alvarez M., Zarza, E.; Concentrating solar thermal power; Handbook of energy efficiency and renewable energy; Boca Raton, FL: CRC Press; 2007.