

PRUEBA DE CALIDAD EN LA SUPERFICIE REFLECTORA DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE CANAL PARABÓLICO CON EL USO DE LUZ ESTRUCTURADA

QUALITY TEST TO THE PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTOR SURFACE USING STRUCTURED LIGHT

**Víctor Iván Moreno-Oliva*,
Edwin Román-Hernández,
Sergio Arturo Rafael-Esesarte y
Rommel García-Hernández**

Campus Tehuantepec. Universidad del Istmo, Ciudad Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz, 4ª sección, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México, C.P. 70760.

*Autor para correspondencia: vmorenofcfm@hotmail.com

Fecha de recepción: 19 de junio de 2013 / Fecha de aceptación: 18 de marzo de 2014.

RESUMEN

Actualmente, existe un gran interés en el estudio de los sistemas de concentración de radiación solar para el aprovechamiento de este recurso. Diversas geometrías, puntuales, lineales y de no enfoque, han sido usadas para la concentración de radiación solar. La cantidad de energía recolectada por estos sistemas es sensible a deformaciones en la superficie reflectora, por lo que se ha vuelto imprescindible

el desarrollo de técnicas para el control de calidad. En este trabajo se desarrolló una técnica óptica basada en el método de triangulación láser, para la cual se utilizó 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. Para conseguir una reconstrucción digital del objeto completo se realizó un barrido o escaneo de la línea proyectada sobre el objeto de prueba. Usando este método, se evaluó la superficie reflectora de un prototipo de concentrador solar de canal parabólico de 1 250 mm de longitud en su apertura y 914 mm de longitud de canal. Como resultado se obtuvo la forma real de la superficie del colector, lo

que permitió calcular el foco real del mismo. Además, el rango de diferencias entre la superficie real y la superficie que mejor se ajusta fue del orden de ± 10 mm. A partir de los resultados, se concluye que esta técnica puede aplicarse a la mejora en los procesos de manufactura de sistemas de concentración solar. La técnica puede ser adaptable para la evaluación de pequeños objetos, obteniéndose alta sensibilidad en el eje Z.

PALABRAS CLAVE:

Concentradores solares, pruebas ópticas, óptica geométrica.

ABSTRACT

Currently, there is considerable research on the study of solar collection systems to take full advantage of this resource. Several geometries, such as point-like, linear and non-focus, have been used for the concentration of solar radiation. Solar radiation concentrated by this system is sensitive to deformations on the reflecting surface. Therefore, several techniques of optical testing for quality control of the reflecting surface have been developed. In this work we developed an optical technique based on a laser triangulation method that used the projection of a laser beam onto the surface to be evaluated, a camera placed perpendicular to a reference plane, and the object under study. The technique associates lateral displacements of the laser beam, observed by the camera, with changes in height of the object relative to the reference plane, using a mathematical model. To obtain a digital reconstruction of the whole object, we scanned it using the projected beam. Through this method we evaluated the reflecting surface of a parabolic trough solar concentrator prototype with a 1 250 mm opening and 914 mm trough. As result, we obtained the real shape of the collector surface, which allowed calculating its real focus. Furthermore, the range of differences between the real and the best fit surface was approximately ± 10 mm. From this results, we concluded that the technique can be applied

to improve the manufacturing processes of solar concentrating systems. The technique can be adapted to evaluate small objects with high sensitivity in the Z axis.

KEYWORDS: Solar collectors, optical testing, geometrical optics.

INTRODUCCIÓN

En la industria, existe la necesidad de evaluar la superficie de piezas que siguen un estricto control de calidad. La determinación de parámetros de rugosidad, la inspección de la topografía y micro-topografía de superficies (Costa y Almeida, 1993; Cha y col., 2000; Snellenburg y col., 2010; Martínez, 2012; Zhenxing y col., 2013); son algunos de los procedimientos para el control de calidad o inspección industrial. En dichos procedimientos son empleados dispositivos como rugosímetros, sensores ópticos, perfilómetros, sistemas scanner, entre otros.

Existen varios parámetros para clasificar un sistema de inspección, los cuales se clasifican en dos tipos, sistemas de contacto (palpadores mecánicos) y sistemas de no contacto (ópticos). Estos últimos tienen la ventaja de no dañar la superficie bajo prueba. Además, existen métodos ópticos, como interferometría (Hou y col., 2007; Peterhänsel y col., 2013), microscopía confocal (Zhao y col., 2012; Dehez y col., 2013), técnicas de Moiré (Shien y Takashi, 2012; Tang y col., 2012), de proyección de franjas y triangulación láser (Rioux, 1984; Zhong, 2001; Wang, 2003; Rueda y col., 2004; Moreno y col., 2005;

Gutiérrez y col., 2013; Miks y col., 2013), que compiten en efectividad, tiempo de análisis, resolución, rango de medición y costo. Algunos trabajos relacionados con la evaluación de la superficie reflectora de concentradores solares con geometría de canal parabólico han sido desarrollados usando técnicas geométricas, como el uso de un perfilómetro óptico (Maccari y Montecchi, 2007), donde es empleado el haz de un láser directamente sobre la superficie del colector, y la posición del haz reflejado revela información de las irregularidades de las pendientes locales. Para obtener una información completa es necesario un escaneo en dos direcciones, lo que hace la prueba más lenta y requiere de un sistema mecánico para la traslación en dos ejes del escáner. Otra propuesta interesante es la referencia (Francini y col., 2012), donde se emplea una pantalla con un arreglo de líneas formando una rejilla cuadrículada. Esta pantalla es enrollada en el tubo receptor del concentrador de canal parabólico y las imágenes son tomadas a diferentes posiciones con una cámara digital. Para una evaluación completa del sistema de colección se requiere del conjunto de varias imágenes tomadas con la cámara a diferentes posiciones. Trabajos más recientes (Moreno y col., 2012), proponen una pantalla nula para la evaluación cualitativa y cuantitativa completa de un segmento del concentrador, con la toma de una sola imagen.

El objetivo de este trabajo

fue desarrollar teórica y experimentalmente un sistema de digitalización de objetos para adaptarlo a la inspección y control de calidad de la superficie reflectora de un concentrador de canal parabólico (CCP). Se presentan el esquema del arreglo experimental, el modelo matemático, así como el desarrollo del software para la digitalización de objetos.

MATERIALES Y MÉTODOS**Materiales**

El instrumento fue construido en aluminio, el sistema óptico (cámara Canon Mod. DS126291, Taiwán) y láser de estado sólido (clase III, 532 nm, < 50 mW, Taiwán) fue montado sobre una platina. Esta platina fue adaptada a un mecanismo de desplazamiento lineal, por medio de un riel óptico graduado, de 900 mm de longitud, de la marca Edmund Optics, Stock No. A54-402 (E.U.).

Metodología

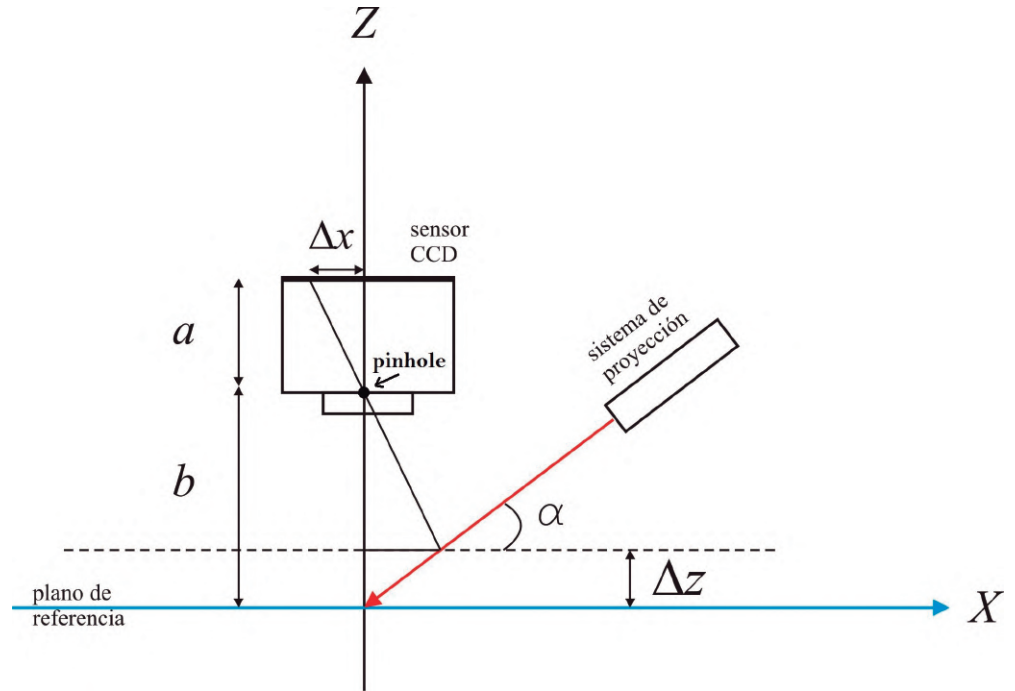
El sistema óptico es colocado de manera tal, que el campo de visión de la cámara cubra en su totalidad el área del objeto, por la sección más pequeña del sensor CCD de la cámara (14.8 mm); y por la sección más grande (22.2 mm), fueron medidos los desplazamientos de la línea láser.

El proceso de evaluación comienza ajustando el campo de visión de la cámara respecto al objeto a evaluar, después se proyecta la línea láser sobre el plano de referencia, y la cámara observa la línea recta de la proyección al centro de la imagen, donde la coordenada en X es tomada como posición inicial

Figura 1.

Esquema básico de medición del instrumento.

Figure 1. Basic measurement scheme of the instrument.



o de referencia. Posteriormente, se coloca el objeto de prueba sobre el plano de referencia y se realiza un barrido lineal en la dirección ortogonal al desplazamiento del instrumento. Los desplazamientos del instrumento fueron realizados cada 10 mm, y los cambios de la posición de la línea se observaron con la cámara. Estos cambios o desplazamientos de la línea, se hicieron en la dirección X, medidos pixel a pixel a lo largo de toda la línea sobre el eje Y, evaluando perfil a perfil el objeto. El sistema propuesto se basa en los métodos de triangulación láser; se emplea un sistema de proyección, el cual consiste en un láser que proyecta una línea sobre un plano de referencia a un ángulo α , una cámara que detecta la posición de la línea colocada de manera perpendicular al plano de referencia, y un sistema de traslación lineal para realizar el barrido de la cámara y el sistema de proyección en conjunto, sobre el objeto de interés. El esquema de medición del instrumento se muestra en la Figura 1.

La línea láser entra en contacto con el objeto y es distorsionada por los cambios de altura Δz del objeto respecto a un plano de referencia, estos cambios de altura son detectados por la cámara como desplazamientos laterales. A partir de la Figura 1, un cálculo directo muestra que la expresión que asocia los desplazamientos laterales Δx con cambios de altura está dada por:

$$\Delta z = \frac{b\Delta x \tan \alpha}{a + \Delta x \tan \alpha} \quad (1)$$

donde a es la distancia entre el pinhole (diafragma de la cámara) y el plano del sensor de la cámara; b es la distancia entre el pinhole y el plano de referencia; y α el ángulo de inclinación del sistema de proyección. El sistema de detección y proyección en conjunto realiza un barrido lineal a lo largo del objeto, perfil a perfil, para obtener la digitalización completa de la superficie.

Sensibilidad

Si el desplazamiento mínimo que es observado por la cámara es de un pixel, entonces la resolución queda determinada con la Ecuación (1), donde Δx equivale a dividir el tamaño del sensor de la cámara en la dirección X entre su resolución en la misma dirección, es decir:

$$\Delta x(1\text{pixel}) = \frac{\text{tamaño_sensor}}{\text{tamaño_pixeles}} \quad (2)$$

En la Figura 2a, se muestra la curva de sensibilidad del instrumento en función al ángulo del sistema de proyección. Esta curva se obtiene a partir de la expresión (1), usando valores para el ángulo en un barrido de 0° a 90° ; obteniéndose los valores correspondientes sobre el eje Y de la gráfica, el valor de sensibilidad incrementa conforme el ángulo de inclinación α disminuye respecto al plano de referencia. Es decir, cambios de altura más pequeños pueden medirse a menor ángulo de inclinación del sistema de proyección.

En la Figura 2b se muestra la gráfica de la relación existente entre los desplazamientos axiales Δz (mm) del

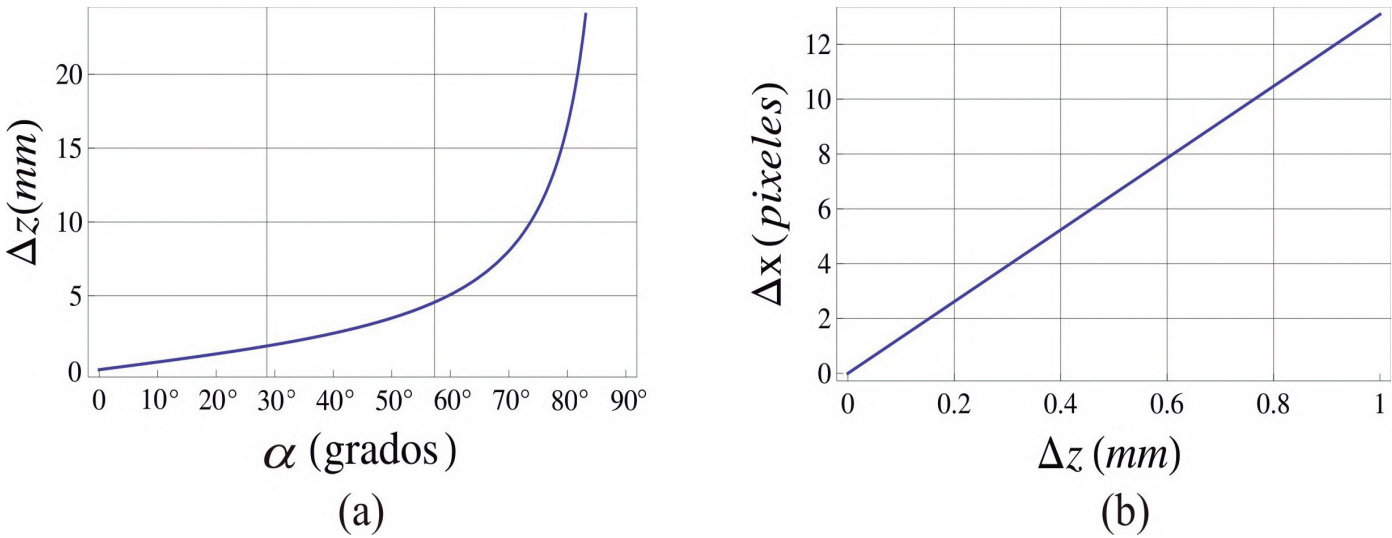
instrumento respecto el plano de referencia, y los desplazamientos laterales de la línea láser (Δx , pixeles), observados por la cámara. Esto se obtiene de igual manera a partir de la ecuación (1), usando valores de Δz en un intervalo de 0 mm a 1 mm, obteniéndose los correspondientes valores Δx asociados.

Puede observarse que la Figura 2b presenta un comportamiento lineal. Esta linealidad permite realizar una calibración previa del instrumento, determinando la ecuación de la recta que se ajusta al conjunto de mediciones realizadas, y así obtener de manera directa la altura Δz asociada al desplazamiento lateral Δx de la línea proyectada. Este procedimiento tiene la ventaja de evitar medir los parámetros requeridos para ser usados en la ecuación (1) del modelo matemático.

Figura 2.

a) Curva de sensibilidad del instrumento; b) Relación entre los desplazamientos axiales del instrumento (mm) y los desplazamientos laterales de la línea láser observados por la cámara (píxeles).

Figure 2. a) Sensitivity curve of the instrument; b) Relation between axial displacements of the instrument (mm) and lateral displacements of the laser beam observed by the camera (pixels)



Software

La metodología para el diseño del software en este trabajo se basó en implementar de forma eficiente: a) la adquisición de la imagen; b) el mejoramiento de la imagen de entrada mediante filtros; c) el cálculo de los centroides a lo largo de cada perfil evaluado y; d) la determinación de la coordenada Z con la Ecuación (1).

En la Figura 3, se muestra un esquema general de la secuencia de operaciones realizadas por cada imagen capturada en el proceso de escaneo. El proceso de adquisición de la imagen se realiza por medio de la cámara digital y a través de una interfaz con la plataforma Matlab, usando la función getsnapshot.

La evolución del procesamiento realizado se muestra en la Figura 4, donde se muestra cada proceso aplicado a la imagen. La imagen inicial (Figura 4a) es convertida a escala de grises (Figura 4b) usando la función "rgb2gray", y para mejorar sus características de intensidad y disminuir el ruido que contiene, es necesario aplicar una etapa

de suavizamiento por medio de un filtro gaussiano (Figura 4c). La imagen capturada y transformada a escala de grises es filtrada usando la función "imfilter" predefinida en Matlab. Posteriormente, la imagen es binarizada (Figura 4d) para separar la imagen de la línea láser proyectada y el fondo usando la función "im2bw" y

Figura 3.

Esquema general de las operaciones realizadas por el software.
Figure 3. General scheme of the operations performed by the software.

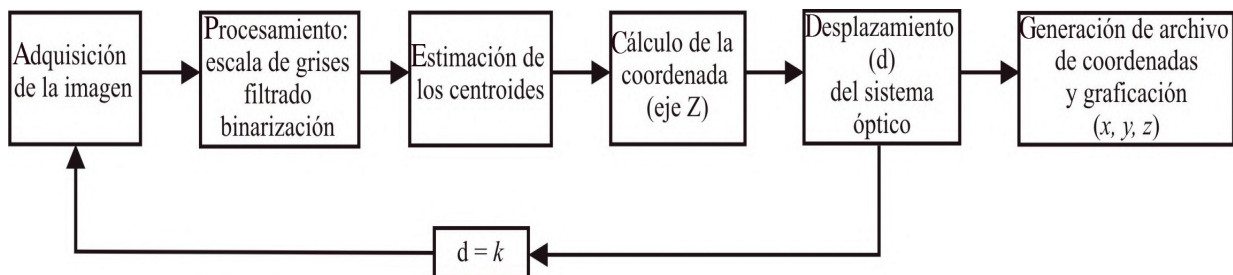
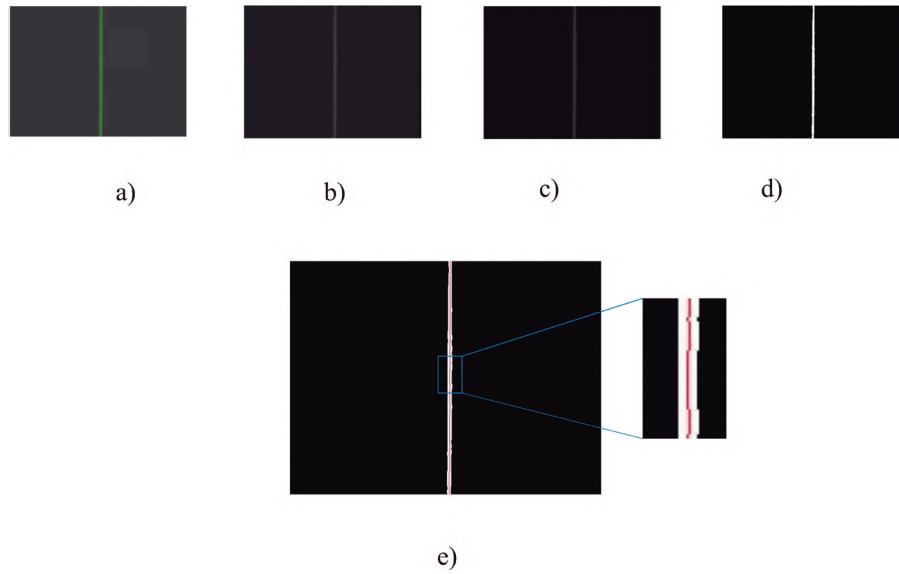


Figura 4.

Evolución en el procesamiento de la imagen de la línea láser proyectada. a) Imagen inicial; b) escala de grises; c) aplicación del filtro gaussiano; d) imagen binarizada; y e) estimación de los centroides por cada fila en la imagen.

Figure 4. Processing evolution of the projected laser beam. a) initial image; b) gray scale image; c) application of Gaussian filter; d) binarized image; e) centroids estimation for each row in the image.



un valor de umbral "u" definido convenientemente. Esto permite delimitar los píxeles que no pertenezcan a los de la imagen de la línea proyectada. Para ello, el criterio usado, es obtener un valor de 0 si a_{ij} (el píxel i-j-ésimo de la imagen de tamaño ixj) $\leq u$, y 1 (valor en píxel

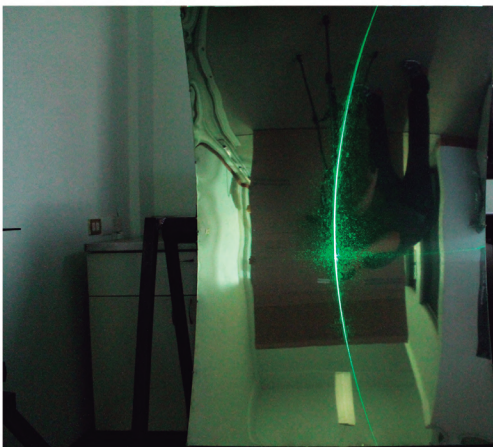
255) en otro caso. Después, para estimar los valores de la posición de todos los puntos (píxeles) de la línea láser proyectada, se determinan los centroides por cada fila de la imagen (Figura 4e). Este proceso se repite por cada desplazamiento realizado, y

finaliza hasta recorrer el total de la longitud del objeto. Finalmente, se guardan todos los valores de las coordenadas (X, Y, Z) obtenidos por cada punto evaluado y se grafican, obteniéndose como resultado la reconstrucción digital. Para conocer cuál es la superficie

que mejor se ajusta al conjunto de datos obtenidos de forma experimental y así obtener la distancia focal real aproximada del colector, se empleó el método de mínimos cuadrados (Bevington y Robinson, 1992), lo que permitió ajustar los puntos obtenidos a la ecuación

Figura 5a.

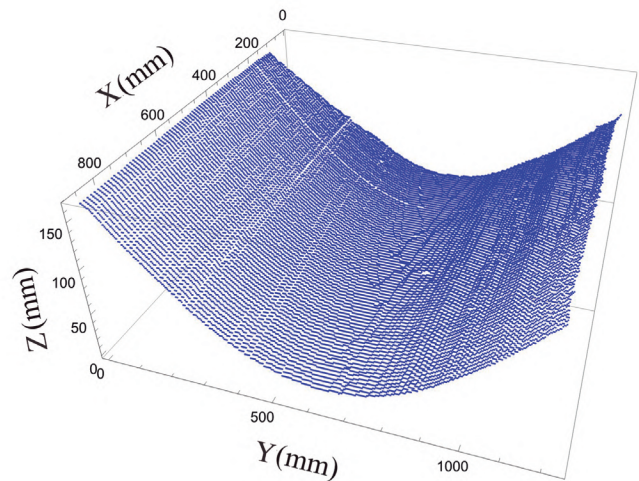
Segmento del CCP y la proyección del láser sobre la superficie.
Figure 5a. Segment of the PTSC and the laser projection on the surface.



(a)

Figura 5b.

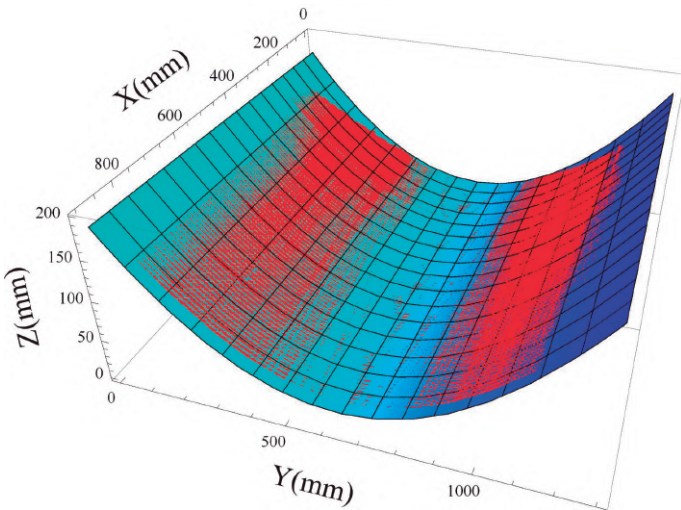
Reconstrucción digital de la forma de la superficie del CCP.
Figure 5b. Digital reconstruction of the shape of the PTSC surface.



(b)

Figura 6.

Gráfica de la mejor superficie ajustada por mínimos cuadrados y el conjunto de puntos obtenidos en la medición.
 Figure 6. The best adjusted fit surface by least squares and and the set of points obtained in the measurement.



de una sección cónica dada por:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (3)$$

y los coeficientes encontrados de la superficie que mejor se aproxima a este conjunto de puntos, fueron:

$$A = -2.86777 \times 10^{-6}, B = 5.46297 \times 10^{-6}, C = 0.00040215, D = 0.0159372, E = -0.516743, F = 171.59.$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5a muestra el CCP y la proyección del láser sobre la superficie, y la Figura 5b la reconstrucción digital de su forma. La potencia del láser usado permite observar por proyección la línea láser sobre la superficie, aunque las mediciones fueron

tomadas en el laboratorio sin fuentes de luz externas. El número total de perfiles evaluados fue de 86, tomando la mayor parte de área la superficie del colector. La sensibilidad con la que se evaluó la calidad de la superficie fue del orden de 0.49 mm, los parámetros para la evaluación del CCP se muestran en la Tabla 1.

A partir de los datos obtenidos se observó que la superficie que mejor se ajusta al conjunto de puntos, corresponde a un canal parabólico cuyo vértice se encuentra desplazado del origen (Figura 6), y con términos de inclinación debido a posibles desalineaciones entre el sistema de desplazamiento lineal, en la medición, y el CCP.

Con la expresión (3) y realizando cortes sobre el eje $X = t$ (t constante) y analizando los perfiles parabólicos

Tabla 1.

Parámetros asociados para la reconstrucción del CCP.
 Table 1. Associated parameters for the reconstruction of the PTSC.

Parámetro	CCP
<i>a</i>	18 mm
<i>b</i>	1 715.58 mm
<i>α</i>	45°
Tamaño del sensor	4 272 pixeles x 2 848 pixeles (22.2 mm x 14.8 mm)

resultantes, se determina el valor de la distancia focal aproximada del CCP. Este valor difiere 101 mm del valor teórico, es decir, el valor del foco real (aproximado) es del orden de 601 mm. Las diferencias entre el ajuste y los datos tienen una desviación media absoluta del orden de 0.71 mm, con un error de ajuste del orden de 2.11 mm. Estas diferencias se atribuyen al hecho de una mala adaptación y pegado de la superficie de acero inoxidable a las costillas que transmiten la forma parabólica, además que el acero inoxidable se deforma muy fácilmente al manipularse y al realizarse los cortes. Castañeda y col. (2012), demostraron cómo pequeñas deformaciones en la superficie de un sistema de concentración influyen en la región de concentración, y por lo 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 para aprovechar al máximo la concentración de la energía solar (Dehra, 2010). La sensibilidad del instrumento depende de la inclinación del sistema de proyección, del campo de visión de la cámara y la resolución

de la misma, pudiéndose aumentar al orden de decenas de micrómetros para estudios de micro topografía.

CONCLUSIONES

El diseño y construcción de un escáner láser para la digitalización de objetos, adaptado para realizar pruebas de calidad de la superficie reflectora de un concentrador con geometría de canal parabólico (CCP), resultó tan versátil que puede ser adaptado a una máquina Computer Numerically Controlled (CNC), y generar archivos Computer Aided Manufacturing (CAM). Además, es posible realizar una configuración para la evaluación de pequeños objetos para un estudio micro topográfico. La prueba de calidad mostró que el método desarrollado permite establecer si existen errores en la superficie reflectora, facilitando con ello el poder mejorar el proceso de manufactura y producción del CCP.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), México, bajo los proyectos: UNISTMO-PTC-066, UNISTMO-PTC-071, y por UNISTMO-CA-13.

REFERENCIAS

- Bevington, P. R. and Robinson, D. K. (1992). *Data Reduction and Error Analysis for the physical Sciences*. 2nd ed. U.S.A.: McGraw-Hill.
- Castañeda, A., Román, E. y Moreno, V. I. (2012). Cáusticas generadas por superficies deformadas. LV Congreso Nacional de Física, XXV RAO-2012. ISSN 0187-4713. [En línea]. Disponible en: www.cio.mx/~memorias/. Fecha de consulta: 28 de octubre de 2013.
- Cha, S., Lin, P. C., Zhu, L., Sun, P. C., and Fainman, Y. (2000). Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning. *Applied Optics*. 39: 2605-2613.
- Costa, M. F. and Almeida, J. B. (1993). System of optical noncontact microtopography. *Applied Optics*. 32: 4860-4863.
- Dehez, H., Piché, M. and De Koninck, Y. (2013). Resolution and contrast enhancement in laser scanning microscopy using dark beam imaging. *Optics Express*. 21: 15912-15925.
- Dehra, H. (2010). Solar energy absorbers, solar collectors and panels, theory and applications, Dr. Reccab Manyala (Ed.). [En línea]. Disponible en: www.intechopen.com/books/solar-collectors-and-panels-theory-and-applications/solar-energy-absorbers. Fecha de consulta: 28 de octubre de 2013.
- Francini, F., Fontani, D., Sansoni, P., Mercatelli, L., Jafrancesco, D., and Sani, E. (2012). Evaluation of surface slope irregularity in linear parabolic solar collectors. *International Journal of Photoenergy*. Doi:10.1155/2012/921780.
- Gutiérrez, J., Mosiño, J., Martínez, A., Gutiérrez, T., Vázquez, E., and Arroyo, J. (2013). Practical eight-frame algorithms for fringe projection profilometry. *Optics Express*. 21: 903-917.
- Hou, X., Fan, W., Li, Y., and Qiang, C. (2007). Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method. *Optics Express*. 15: 12890-12899.
- Maccari, A. and Montecchi, M. (2007). An optical profilometer for the characterization of parabolic trough solar concentrators. *Solar Energy*. 81(2): 185-194.
- Martinez, J. C., Alonso, J., Pedrero, J. A., and Quiroga, J. A. (2012). Topographic optical profilometry by absorption in liquids. *Optics Express*. 20: 28631-28640.
- Miks, A., Novak, J., and Novak, P. (2013). Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule. *Optics Express*. 21: 18225-18235.
- Moreno, V. I., Castañeda, A., Román, E. y Campos, M. (2012). Prueba de un colector solar de canal parabólico por medio de una pantalla nula cilíndrica. LV Congreso Nacional de Física, XXV RAO-2012. ISSN 0187-4713. [En línea]. Disponible en: www.cio.mx/~memorias/. Fecha de consulta: 28 de octubre de 2013.
- Moreno, V. I., Robledo, C., Cordero, A. y Nanco, P. (2005). Reconstrucción 3D de la sagita de una superficie en rotación. *Revista Mexicana de Física*. 51: 636-640.
- Peterhänsel, S., Pruss, C., and Osten, W. (2013). Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation. *Optics Express*. 21: 11638-11651.
- Shien, R. and Takashi, M. (2012). Theoretical error analysis of the sampling moiré method and phase compensation methodology for single-shot phase analysis. *Applied Optics*. 51: 3214-3223.
- Rioux, M. (1984). Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied Optics*. 23: 3837-3844.
- Rueda, J. E., Salazar, A. y Meneses, J. (2004). Construcción de un scanner óptico para registrar imágenes 3-d utilizando la técnica de triangulación laser. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. Universidad de Pamplona. 2: 65-72.
- Snellenburg, J., Braaf, B., Hermans, E., Van-der-Heidje, R., and Sicam, V. (2010). Forward ray tracing for image projection prediction and surface reconstruction in the evaluation of corneal topography systems. *Optics Express*. 18: 19324-19338.
- Tang, M., Huimin, X., Jianguo, Z., Xiaojun, L., and Yanjie, L. (2012). Study of moiré grating fabrication on metal samples using nanoimprint lithography. *Optics Express*. 20: 2942-2955.
- Wang, Y. (2003). Three-dimensional profilometer for supersmooth surface. *Optics Energy*. 42: 3013-3016.
- Zhao, W., Chao, L., and Lirong, Q. (2012). Laser divided-aperture differential confocal sensing technology with improved axial resolution. *Optics Express*. 20: 25979-25989.
- Zhenxing, H., Huiyang, Luo., Yingjie, D., and Hongbing, L. (2013). Fluorescent stereo microscopy for 3D surface profilometry and deformation mapping. *Optics Express*. 21: 11808-11818.
- Zhong, J. (2001). Linear integer unconcerned phase-map profilometry by changing the projection angle of the grating. *Optics Energy*. 40: 1377-1382.