

# Uso de Tecnologías Open Source en el Desarrollo de Sistemas de Control de Helióstatos

Benitez Baltazar Victor Hugo, Pacheco Ramírez Jesús Horacio, Iriarte Cornejo Cuitlahuac y Rodríguez Carbajal Ricardo Alberto.

Departamento de Ingeniería Industrial  
Área de Mecatrónica  
Universidad de Sonora  
Hermosillo, Sonora, México  
[vbenitez@industrial.uson.mx](mailto:vbenitez@industrial.uson.mx)

## Resumen

*En el éste artículo se presenta una estrategia basada en herramientas Open Source, para implementar algoritmos de control aplicados a una instalación termosolar de tecnología de Torre Central ubicada en las instalaciones del Campus de Agricultura de la Universidad de Sonora. Se consideran las ventajas de las herramientas Open Source como son: bajo costo, facilidad de adquisición, disponibilidad, documentación, etcétera, las cuales resultan atractivas para países en vías de desarrollo como México. El enfoque presentado puede ser usado para implementar estrategias que aceleren el tiempo de desarrollo bajo presupuestos reducidos y limitados como los típicos de las economías en desarrollo.*

*En este artículo, se implementa y se pone a prueba, un esquema de control en lazo cerrado en tiempo real en la Plataforma Solar Hermosillo, ubicada al noroeste de México, la cual, sirve como plataforma de prueba para el desarrollo de tecnología termosolar.*

**Palabras clave:** Energía renovable, Controlador embebido, Algoritmos de concentración solar.

## 1. Introducción

Uno de los principales retos a enfrentar en la tecnología de Planta de Torre Central Solar, es el control de los helióstatos. El helióstato es un dispositivo electromecánico capaz de redirigir los rayos solares hacia un punto específico por medio de un espejo. En [1] y [2] se muestra el diseño de un prototipo de helióstato y la implementación de algoritmos de control en tiempo real llevados a cabo en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Sonora. A lo largo de los años se han propuesto diversas estrategias de diseño de helióstatos como se menciona en [3] y del campo de helióstatos como se detalla en [4], para reducir costos y optimizar la captación de energía térmica. La experiencia adquirida en el diseño de sistemas de control de seguimiento solar, así como su implementación en tiempo real [1], ha demostrado dos tendencias a considerar en su desarrollo; por una parte, el tema del diseño de estructuras de control y su implementación en tiempo real no ha sido suficientemente abordado por la comunidad científica en México, evidencia de ello es la escasa literatura reportada. Los trabajos publicados en el diseño de controladores para sistemas de seguimientos solar son pocos [2], [5], [9], [10] a pesar de que existen ya instalaciones tecnológicas en pleno desarrollo que requieren de sistemas de control, la gran mayoría de ellos, utilizan técnicas de visión artificial, cuya implementación es costosa y compleja. En este último sentido, el tema del costo de desarrollo de estrategias de control adecuadas al problema del seguimiento solar es de suma importancia en una economía emergente como México, si es que se desea efectivamente tener presencia en el área de las energías renovables en el ámbito internacional. Los bajos presupuestos en

ciencia y tecnología, comparados con los países desarrollados [11], [12], obliga a los investigadores a buscar estrategias de desarrollo económicas y confiables.

En este artículo se discutirá el reto de implementar estrategias de control dentro del marco de la tecnología de torre central solar y se presentará una propuesta del uso de herramientas *open source* como plataformas de desarrollo viables económicamente por ser de especial interés para la comunidad científica que investiga en el área de las fuentes renovables de energía, el desarrollo de esta clase de tecnología.

## 2. Concentración solar

Existen diferentes tecnologías para producir potencia eléctrica usando la energía solar, las cuales, pueden ser clasificadas como directas e indirectas [5]. Las primeras usan celdas fotovoltaicas mientras que las segundas, en general, se caracterizan por coleccionar y concentrar la potencia solar para producir vapor y ser usado por una turbina para generar potencia eléctrica. La potencia eléctrica producida por metodologías indirectas utiliza principalmente las siguientes tecnologías: canal parabólico, plato parabólico, *fresnel* lineal y torre central solar (TCS) como es posible observar en la Fig. 1.

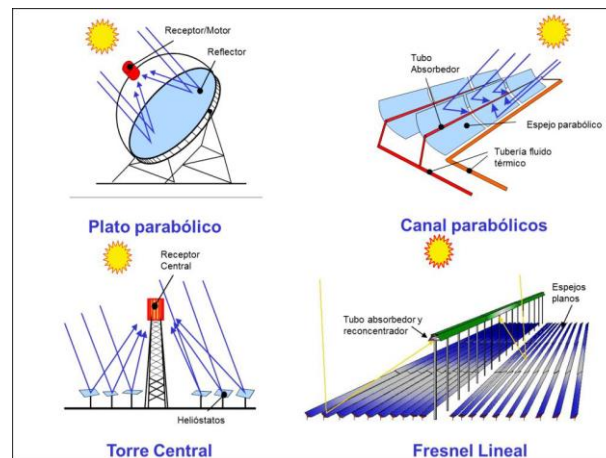


Figura 1. Tecnologías de concentración solar.

La tecnología TCS se caracteriza por la utilización de espejos colocados sobre estructuras electromecánicas llamadas heliostatos, para coleccionar la energía solar en un receptor central montado en lo alto de una torre. Por más de 30 años, el desarrollo de TCS se ha venido suscitando, desde los primeros esfuerzos serios llevados a cabo por los laboratorios Sandia, Westinghouse y General Electric, como se constata en [6], [7], [8], hasta las modernas instalaciones de la PS10, PS20 y Gemasolar inauguradas en años recientes en España. Actualmente existen varios proyectos ambiciosos en Estados Unidos, España, China y Sudafrica; el más grande de estos, llevado a cabo en el proyecto Ivanpah que pretende instalar un complejo de tres TCS con capacidad de más de 350 MW de potencia eléctrica anual. En México, se han dado los primeros pasos en la Plataforma Solar Hermosillo (PSH), anteriormente conocida como Campo de Prueba de Heliostatos, la cual, consta actualmente de un campo con diversos prototipos de heliostatos, véase Fig. 2.



**Figura 2. Plataforma Solar Hermosillo.**

### **3. Algoritmos de seguimiento solar**

Los sistemas de concentración requieren de un sistema de control de seguimiento solar, con la precisión suficiente para un funcionamiento óptimo.

En la literatura se pueden encontrar diversos algoritmos de seguimiento solar, los cuales se pueden agrupar en dos categorías: los de precisión astronómica y los de precisión limitada. Los primeros se caracterizan por usar ecuaciones complejas que determinan con alto grado de precisión la posición solar. Los últimos son sencillos computacionalmente, con una gran cantidad de simplificaciones en las relaciones astronómicas y requieren de una mínima cantidad de datos de entrada para calcular el vector solar. Ejemplos de algoritmos simples computacionalmente, se pueden encontrar en [13], [14], [15]. Algoritmos de alta complejidad se detallan, por ejemplo en [16], [17]; a esta última categoría pertenece el algoritmo SPA (Solar Position Algorithm), cuya precisión para calcular el vector solar ronda en  $\pm 0.0003^\circ$  y es usado como referente para validar los algoritmos existentes en la actualidad.

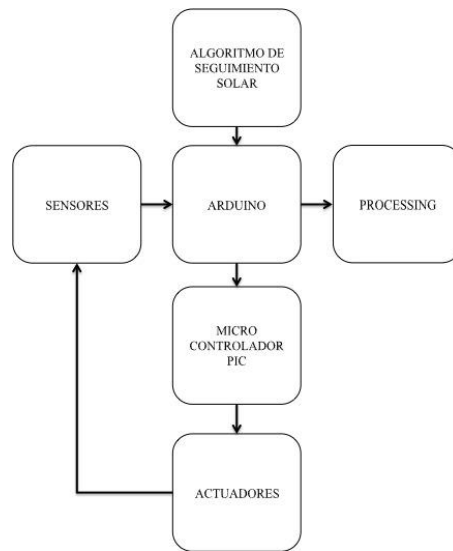
#### **3.1 Antecedentes**

En la PSH, se ha trabajado en la implementación de diferentes algoritmos de control. Todos ellos con éxitos parciales como se ha reportado en [1], [19], [20], [21]. Sin embargo, el costo de implementar una estrategia de control integral, para un campo de heliostatos, no ha sido realizado. Los algoritmos han sido diseñados para controlar no más de tres heliostatos y su desempeño depende en gran medida del hardware seleccionado. La mayoría de controladores que se han implementado en la PSH están implementados en PC y en CompactRIO. Los costos económicos de estos desarrollos experimentales son altos; usar estas plataformas de hardware para el control de cientos de unidades de heliostatos es una estrategia que no parece viable con los presupuestos en ciencia y tecnología actuales. Más aún, se requiere desarrollar plataformas de hardware “hechas a la medida”; el hardware hasta ahora utilizado contiene prestaciones más allá de las requeridas para el control de heliostatos.

Los sistemas embebidos basados en microcontrolador son una opción viable para afrontar los retos del seguimiento solar. Existen en el mercado diversos controladores basados en sistemas embebidos y en la PSH se ha implementado un algoritmo de control en lazo abierto para el control de una matriz de mini heliostatos con microcontrolador cuya patente se encuentra en trámite.

### 3.2 Herramientas Open Source

Para continuar con el desarrollo e implementación de algoritmos de control de helióstatos, se propone el uso de herramientas *open source* como una estrategia viable desde el punto de vista económico y técnico. Son bastantes conocidas en la comunidad, tanto el hardware como el software de código abierto. Para este caso se han seleccionado dos herramientas de código abierto donde se implementará un algoritmo de control en lazo cerrado para mini helióstatos ubicados en la PSH. Se utilizó Arduino para la implementación del algoritmo de control y *Processing* para la visualización de resultados. La estrategia de control diseñada se muestra en la Fig. 3.



**Figura 3. Estrategia para la implementación del algoritmo de control.**

El sistema cuenta con potenciómetros como sensores de posición en cada actuador. El algoritmo implementado es el desarrollado en [1]. Se usa la tarjeta Arduino UNO basada en el microcontrolador *ATMEGA328*. El control de los actuadores, los cuales son de tipo *stepper motor*, se lleva a cabo por medio de un microcontrolador *PIC16F84*. Finalmente, los resultados son mostrados en tiempo real por medio de una interfaz gráfica diseñada en *Processing*. El costo estimado de esta plataforma experimental no es mayor de 70 dls, siendo evidente la oportunidad de reducir costos de desarrollo al usar esta estrategia de *prototipado rápido*.

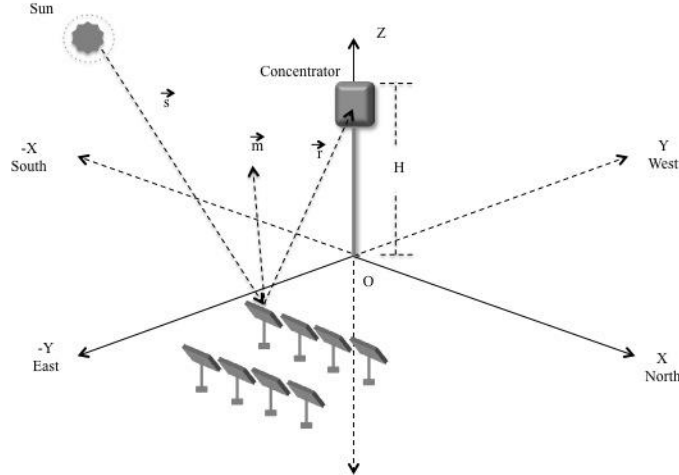


Figura 4. Campo de Heliostatos.

### 3.3 Algoritmo

El algoritmo desarrollado pertenece a la categoría de algoritmos de precisión limitada como se mencionó en la sección II. De acuerdo a la Fig. 4, sea  $\vec{s}$  el rayo de luz proveniente del sol;  $\vec{r}$  el rayo de luz reflejado hacia un punto de la torre y  $\vec{m}$  el vector normal al plano del espejo. Los tres vectores anteriores se pueden representar como

$$\begin{aligned}\vec{s} &= s_x\vec{i} + s_y\vec{j} + s_z\vec{k}, \\ \vec{r} &= r_x\vec{i} + r_y\vec{j} + r_z\vec{k}, \\ \vec{m} &= m_x\vec{i} + m_y\vec{j} + m_z\vec{k}.\end{aligned}\tag{1}$$

Las componentes del vector  $\vec{r}$  se pueden definir en términos de la posición del heliostato y del concentrador al cual apunta de acuerdo a la Fig. 4. Si la posición del heliostato se determina por las coordenadas (X, Y, Z) y H es la altura del concentrador, entonces  $\vec{r}$  se define por sus componentes como

$$\begin{aligned}r_x &= -\frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2+(H-Z)^2}} \\ r_y &= -\frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2+(H-Z)^2}} \\ r_z &= \frac{H-Z}{\sqrt{X^2+Y^2+(H-Z)^2}}\end{aligned}\tag{2}$$

Considerando que, el vector proveniente del Sol  $\vec{s}$ , puede ser determinado por la latitud  $\phi$ , el ángulo horario solar  $\omega$  y el ángulo de declinación solar  $\delta$ ; la latitud es una constante que depende de la región geográfica, mientras que  $\omega$  y  $\delta$  se pueden calcular por

$$\omega = 15(\text{hora} - 12)\tag{3}$$

$$\begin{aligned}\delta &= 0.006918 - 0.3999 \cos(\vartheta) + 0.070257 \sin(\vartheta) \\ &\quad - 0.006758 \cos(2\vartheta) + 0.000907 \sin(2\vartheta) \\ &\quad - 0.002697 \cos(3\vartheta) + 0.00148 \sin(3\vartheta)\end{aligned}\tag{4}$$

$$\vartheta = \frac{2\pi(N-1)}{365}\tag{5}$$

donde N = 1, 2, ..., 365, es el número de día del año; entonces, las componentes de  $\vec{s}$ , se determinan como

$$\begin{aligned} s_x &= -\cos(\phi) \sin(\delta) - \cos(\omega) \sin(\phi) \cos(\delta) \\ s_y &= \sin(\omega) \cos(\delta) \\ s_z &= \cos(\omega) \cos(\phi) \cos(\delta) + \sin(\phi) \sin(\delta) \end{aligned} \quad (6)$$

De las leyes de la reflexión se cumple que

$$\vec{r} \times \vec{m} = \vec{m} \times \vec{s} \quad (7)$$

con lo cual, se pueden encontrar las componentes de  $\vec{m}$

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{|s_z+r_z|(s_x+r_x)/(s_z+r_z)}{\sqrt{(s_x+r_x)^2+(s_y+r_y)^2+(s_z+r_z)^2}} \\ m_y &= \frac{|s_z+r_z|(s_y+r_y)/(s_z+r_z)}{\sqrt{(s_x+r_x)^2+(s_y+r_y)^2+(s_z+r_z)^2}} \\ m_z &= \frac{|s_z+r_z|}{\sqrt{(s_x+r_x)^2+(s_y+r_y)^2+(s_z+r_z)^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

El ángulo de elevación  $\beta$ , se calcula por medio de las componentes de  $\vec{m}$  y de las propiedades del producto punto

$$\vec{m} \cdot \vec{k} = \cos(\beta) = m_z \quad (9)$$

$$\beta = \cos^{-1}(m_z) \quad (10)$$

El ángulo acimutal depende del cuadrante donde esté ubicado el helióstato. Para un cuadrante  $X \geq 0, Y \geq 0$  el acimut se calcula como

$$\gamma = \begin{cases} 2\pi - \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x > 0, m_y \geq 0 \\ \pi + \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x \leq 0, m_y > 0 \\ \pi - \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x < 0, m_y \leq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x \geq 0, m_y < 0 \end{cases} \quad (10)$$

En la Fig. 5 se muestra el diagrama a bloques de la implementación del algoritmo de control usando el entorno Processing/Arduino y el microcontrolador PIC.

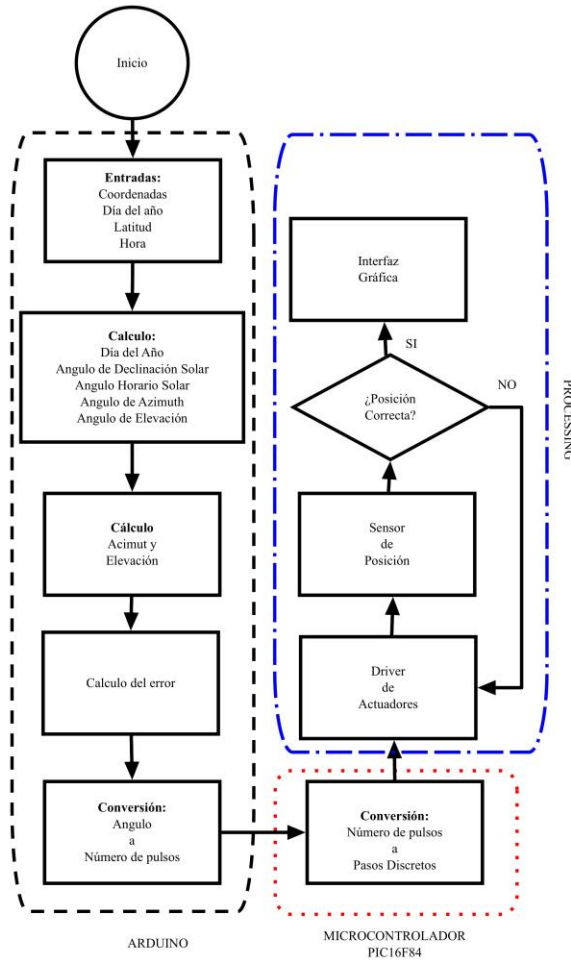


Figura 5. Implementación de algoritmos.

Tabla 1. Comportamiento del ángulo de elevación y del error generado en la implementación.

Hora	Valor Verdadero	Comando del Motor	Comando del Motor Cuantizado	Error
6:00	22.9798	36.6764	37	0.3236
6:01	23.1129	36.5387	37	0.4613
6:02	23.2455	36.4284	37	0.5716
6:03	23.3777	36.2907	37	0.7093
6:04	23.5094	36.1804	37	0.8196
6:05	23.6407	36.0427	37	0.9573

### 3.4 Corrección de error

El cálculo en tiempo real de los ángulos  $\beta$  y  $\gamma$ , introduce un error numérico debido al método de diferencias finitas empleado, al tipo de actuador usado y al mecanismo de transmisión. En [1] se propone un algoritmo de corrección de error, el cual es implementado y evaluado en el algoritmo. Para propósitos de claridad, en la tabla 1 se muestra el comportamiento del ángulo de elevación y el correspondiente error generado por el actuador. Si dicho error no se mantiene acotado, origina problemas de deriva como se analiza en [20].

Con un enfoque de lazo abierto no hay garantía de que el error de seguimiento se mantenga acotado, como se constata en la tabla 1, donde, a partir de un conjunto de datos, se muestra el

comportamiento del error para cinco minutos de calculos. Con el propósito de implementar un esquema en lazo cerrado, se instalaron potenciómetros en los actuadores de tal forma que se contara con un mecanismo de *feedback* económico. En la Fig. 6 se muestra la implementación de la interfaz basada en *Processing*, en donde se muestran los ángulos de seguimiento, la hora del día, y el número de pasos discretos del motor en intervalos de un minuto.

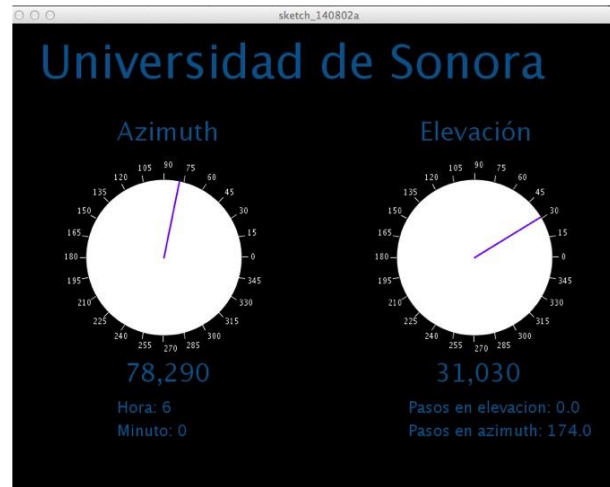


Figura 6. Interfaz gráfica basada en *Processing*.

## 4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de la implementación del algoritmo de seguimiento empleando herramientas *open source*, bajo la siguientes restricciones:

- Velocidad del viento menor a 20 Km/h
- Cielo despejado
- Tiempo de prueba de 1 hora de seguimiento.

Vale la pena señalar que hasta el momento no existen condiciones formalmente definidas sobre las restricciones para conducir las pruebas experimentales. Se requiere más investigación que defina claramente un protocolo de pruebas de los sistemas de control para el seguimiento solar. En las Figs. 7 a la 14, se muestran los resultados de seguimiento solar en un intervalo de 1 hora a diferentes distancias de la torre. El controlador tiene un tiempo de actualización de 1 minuto, el cual se considera suficiente dada la dinámica lenta de la planta. La distancia de 200 m es la más alejada de la torre (Fig. 13) y es donde se instalará en su momento, el heliostato más lejano del campo. En las Figs 12 y 13, se puede notar además, las aberraciones ópticas causadas por las imperfecciones del espejo y por la distancia existente entre el objetivo y el espejo mismo. Otra causa de esta deformidad de la mancha solar mostrada en las Figs 12 y 14, es ocasionada por el procedimiento de adhesión entre el espejo y la superficie metálica que lo soporta.

Como se puede apreciar, el algoritmo implementado tiene un comportamiento aceptable a diferentes distancias. En las figuras 8, 10, 12 y 14, se puede apreciar la mancha solar reflejada en la cima de la torre a diferentes distancias del heliostato. En todas ellas se aprecia que la mancha solar se mantiene en la misma posición durante el tiempo de la prueba, lo cual constituye el objetivo principal de la concentración solar, como fue discutido en la sección II.





Figura 7. Helióstato a 25 m de la torre.



Figura 8. Imagen del rayo solar reflejado a 25 m de la torre.



Figura 9. Helióstato a 50 m de la torre.



Figura 10. Imagen del rayo solar reflejado a 50 m de la torre.



Figura 11. Helióstato a 120 m de la torre.



Figura 12. Imagen del rayo solar reflejado a 120 m de la torre.



Figura 13. Helióstato a 200 m de la torre.



Figura 14. Imagen del rayo solar reflejado a 200 m de la torre.

## 5. Conclusiones y discusión

Un algoritmo de seguimiento solar con retroalimentación ha sido implementado utilizando herramientas *open source*, de fácil adquisición y de bajo costo. La arquitectura de control propuesta permite implementar lazos de control de posición por medio de sensores tipo potenciómetro para los ángulos de acimut y elevación. Un algoritmo de corrección de error de seguimiento fue evaluado con un desempeño adecuado. Por los resultados obtenidos, se puede concluir que es viable el uso de Arduino como plataforma de diseño de un sistema de control embebido para heliostatos. Sin embargo, algunas consideraciones deben de tomarse en cuenta en el uso de este tipo de herramientas.

El seguimiento del vector solar es dependiente del tiempo. Por lo tanto se debe de contar con un sistema de cálculo de la hora en tiempo real. Existen diversos circuitos integrados en el mercado capaces de realizar esta función. En el diseño presentado se obtuvo el valor del reloj desde Processing, lo cual introduce un error por retrasos en el tiempo lo cual, no es conveniente.

Las altas temperaturas y el ambiente desértico propios de las instalaciones de las plantas termosolares hacen del tema de la robustez, un tópico bastante serio al momento de seleccionar una plataforma embebida para el diseño del controlador. Herramientas *open source* como la usada en este trabajo, son adecuadas para acelerar el proceso de diseño ya que son excelentes para realizar pruebas bajo condiciones de laboratorio, pero no han sido suficientemente evaluadas en un ambiente hostil como el de la Plataforma Solar Hermosillo.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo económico brindado con el financiamiento del proyecto bajo la convocatoria del Programa de Estímulos a la Innovación con el proyecto número 199330.

## Referencias

- [1] V. H. Benitez, J. Pacheco-Ramirez and N. Pitalua-Diaz, "Developing a Mini-heliostat Array for a Solar Central Tower Plant: A Practical Experience," *Intelligent Automation & Soft Computing*, Vol. 20, no. 2, pp. 263 – 277, 2014.
- [2] V. H. Benitez, C. A. Eredias y H. M. Ramírez, "Síntesis de señales de control para seguimiento solar y su aplicación a un prototipo de helióstato," VIII CIINDET, pp. 1-6, Cuernavaca, Morelos, 2010.
- [3] X. Wei et al., "A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower plant," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 1970-1975, sept. 2010.
- [4] G. J. Kolb et al., "Heliostats cost reduction study," SAND2007-3293, Sandia National Laboratory, June 2007.

- [5] E. F. Camacho and M. Berenguel, "Control of Solar Energy Systems," Preprints of the 8th IFAC Symp. on Adv. Control of Chemical Processes, Riverfront, Singapore, July 10-13, 2012.
- [6] R. S. Baheti, P. F. Scott, "Adaptive control and calibration of heliostats," *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on*, pp. 298 - 300, 10-12 Dec. 1980.
- [7] R.S. Baheti and R.F. Scott, "Design of Self-Calibrating Controllers for Eeliostats in a Solar Power Plant." *I E E Transactions on Automatic Control*," vol. AC-25, no. 6, 1980.
- [8] D. A. Herbert and G. A. Mutone, "A distributed computer control configuration for a heliostat array field", *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on*, pp.1062,1063, 10-12 Dec. 1980.
- [9] M. Berenguel, F.R. Rubio, and A. Valverde, "An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant," *Solar Energy*, vol. 76, no. 5, 2004, pp. 563-575.
- [10] X Zhu, X. Mi, K. Lin and W. Huang, "Precise sun-tracking control of heliostats based on a sun's image reference system," *Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese*, pp. 2745,2748, May 31, 2014-June 2, 2014.
- [11] Kurt Unger, "Rentabilidad, innovación y políticas de apoyo a Investigación y Desarrollo en México. Una evaluación de los estímulos fiscales a la innovación". Reporte de Investigación elaborado para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México, Conacyt, 2008.
- [12] Disponible en línea : <http://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>, consultado 25/07/2014.
- [13] P.I. Cooper, "The absorption of radiation in solar stills," *Solar Energy*, vol. 12, no. 3, 1969, Pages 333-346.
- [14] L. O. Lamm, "A new analytic expression for the equation of time," *Solar Energy* vol. 26, pp. 465.
- [15] J. W. Spencer, "Fourier series representation of the position of the Sun," *Search*. 2, no. 5.
- [16] J. J. Michalsky, "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050)," *Solar Energy* vol. 40, no. 3, pp. 227–235.
- [17] C. L. Pitman and L. L. Vant-Hull, "Errors in locating the Sun and their effect on solar intensity predictions. In: Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, Denver, 28 Aug 1978, pp. 701–706.
- [18] Zolkapli, M.; Al-Junid, S.AM.; Othman, Z.; Manut, A; Mohd Zulkifli, M.A, "High-efficiency dual-axis solar tracking developement using Arduino," *Technology, Informatics, Management, Engineering, and Environment (TIME-E), 2013 International Conference on* , vol., no., pp.43,47, 23-26 June 2013.
- [19] C. A. Estrada, et. al., "Laboratorio nacional de sistemas de concentración solar y química solar," Informe Técnico, Proyecto Conacyt LN-56918, febrero – diciembre 2010.
- [19] C. A. Estrada, et. al., "Laboratorio nacional de sistemas de concentración solar y química solar," Informe Técnico, Proyecto Conacyt LN-56918, febrero – diciembre 2010.
- [20] M. Escobar-Toledo, et al., "Analysis of drift phenomena in heliostat images," *Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability*, July 23-26, , San Diego, CA, USA, 2012.
- [19] M. G. David, *Sistema de Control para un Conjunto de Helióstatos*, Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Energía, UNAM, 2011.