

## Diseño e implementación de sistema de seguimiento 2D para concentradores fotovoltaicos mediante geometría solar

David R. López Flores<sup>1</sup>, Roberto Herrera Salcedo<sup>1</sup>, Marcelino Sánchez Alvarado<sup>1</sup>, David Dueñez Siqueiros<sup>1</sup>, Luis O. Fernández Tarango<sup>1</sup>, Vanessa I. Márquez Márquez<sup>1</sup>, Pedro D. Olivás Prieto<sup>1</sup>, Andrea K. Ríos Ávila<sup>1</sup>, Valeria E. Tapia Aceves<sup>1</sup>, Abraham Carrasco García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Chihuahua

### Resumen

La cantidad de energía captada en sistemas de concentración solar aumenta de entre un 35 y 50% si la radiación solar incide perpendicularmente al área de captación, implicando en un mejor aprovechamiento del recurso solar disponible, las nuevas tecnologías permiten resolver estos retos manteniendo un costo y consumo de energía aceptables. Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de seguimiento 2D con acción de control en el ángulo de elevación ( $E$ ) y azimutal ( $A$ ), basado en los Microcontroladores ATmega2560 y 328P, Reloj de Tiempo Real ( $RTC$ , del inglés *Real Time Clock*), actuador lineal, motor a pasos, la Unidad de Medición Inercial ( $IMU$ , del inglés *Inertial Measurement Unit*) y el *Software* de instrumentación virtual (*NI LabVIEW*). El control del sistema es mediante un comparador de ventana que relaciona los ángulos actuales  $E$  y  $A$  que provienen del  $IMU$  con los ángulos de referencia Azimutal ( $A_r$ ) y de elevación ( $E_r$ ) determinados en base a Geometría Solar ( $GS$ ) y el  $RTC$ , para obtener la acción de control necesaria en los actuadores, con la finalidad de posicionar perpendicularmente el área de captación con la radiación del Sol. Una interfaz de Instrumentación Virtual permite ver el estado del sistema. El diseño mecánico del prototipo se realizó en *SolidWorks* (programa de dibujo en 3D). El principal aporte en este trabajo es la técnica de control basada en algoritmos de  $GS$ , la técnica de sensado de los ángulos  $E$  y  $A$ , el diseño y construcción del prototipo con tecnologías innovadoras.

**Palabras Clave:** Geometría solar, sistema seguimiento 2D, concentración solar, Microcontrolador, instrumentación.

### Introducción

En México, la capacidad energética instalada a finales de 2014 se registró en 65,451.8 MW, figurando el Gas Natural (55%), Carbón (13%) y el Combustóleo (10%) como fuentes primarias de energía fósil para satisfacer la Red Nacional, que al ser quemadas para producir energía eléctrica desprenden cantidades significativas de un gas incoloro e inodoro llamado Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), representando un impacto no favorable en el cambio climático, debido a que contribuye a un efecto invernadero (SENER 2015). Actualmente se realizan esfuerzos para explorar nuevas formas de energía que puedan reemplazar los combustibles fósiles, como ejemplo, se encuentra la

energía solar, fuente inagotable que recibe nuestro planeta por cerca de 170 billones de kW, 5 veces más que la suma de todas las energías (terrestre, viento, nuclear, geotérmica y gravitacional). Existen tecnologías alternativas, como los sistemas de concentración fotovoltaica que aprovechan la energía solar convirtiéndola a energía eléctrica, y así, contribuir a la demanda energética (Mendieta 2007). Un sistema de concentración fotovoltaica consiste en un arreglo de celdas solares multiunión de alta eficiencia que reciben la radiación solar a través de lentes concentradores que amplifican la potencia del Sol por arriba de 500x,

como resultado de este proceso se obtiene energía eléctrica, la cual podría ser almacenada en un banco de baterías y/o inyectada a la red eléctrica mediante un inversor. Para optimizar del proceso, se requiere que la radiación solar incida perpendicularmente en el área de concentración (Chou *et al.* 2012). Este es un tema donde se centran las investigaciones, como el caso del investigador Santhoshk que presentó un seguidor para celdas solares en 2D utilizando fotorresistencias (*LDR*, del inglés *Light Dependent Resistor*) como sensores de posición solar y un algoritmo de máquinas de soporte vectorial (*SVM*, del inglés *Support Vector Machines*) operando en *LabVIEW* para generar acciones de control en motores a paso que actualizan los ángulos en los ejes del seguidor, presentando capacidades de captación de hasta un 38% (Santhoshk *et al.* 2013). Sharma desarrolló un sistema de seguimiento solar 2D en aplicaciones de concentración fotovoltaica con celdas multiunión (*CPV*, del inglés *Concentrator Photovoltaics*), empleando lentes *Fresnel* de 1250x, demostrando mediante simulación un análisis óptico que arroja las distancias óptimas entre el lente *Fresnel* y la celda (Sharma *et al.* 2015). Derivado de un análisis en los trabajos consultados, podemos determinar que los sistemas de seguimiento solar en 2D se componen de 3 etapas básicas para mantener capacidades de captación de entre un 35 y 40 %. La primera compuesta por sensores (*LDR*, fotodiodos). En la

segunda el controlador (Computador con *LabVIEW*, Microcontrolador, Servidor Web) y algoritmo (*SVM*, mapas solares, control todo/nada, lógica difusa, estimación de coordenadas por procesamiento de imágenes). Por último los actuadores (motores a pasos, actuadores lineales, servomotores, motores de corriente directa *CD*). Algunos sistemas se operan en lazo cerrado y otros no, lo cual depende de la técnica de control implementada (Mahmood 2013), (Malge *et al.* 2015), (Haryanti *et al.* 2014), (Zhang *et al.* 2015), (Kassem y Hamad 2011), (Sohag *et al.* 2015).

En este trabajo se presenta un sistema de seguimiento en 2D (figura 1) que a diferencia de las investigaciones consultadas se emplea como sensor el *IMU* para obtener los ángulos actuales  $E$  y  $A$ , además, en la lógica de control se emplea el desarrollo de algoritmos basados en *GS* y el *RTC*, que son implementados en base al microcontrolador *ATmega2560*. Como actuadores se emplean un motor a pasos y un motor de *DC*. Además, de contar con interfaz de usuario basada en *LabVIEW* (*HMI* del inglés *Human Machine Interface*) y una pantalla de cristal líquido (*LCD*, del inglés *Liquid Crystal Display*) para el monitoreo del estado del proceso. Un botón de paro de emergencia permite desconectar el sistema en caso de falla y un interruptor puede pasar de modo automático a manual para manipular los ejes del sistema.

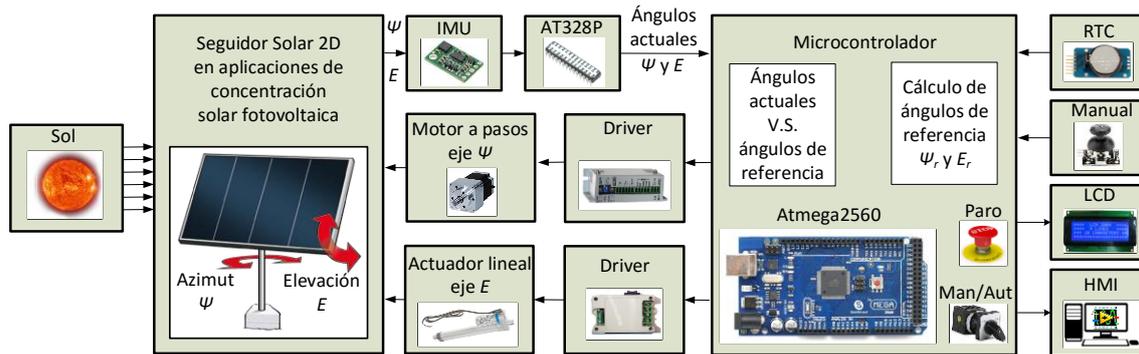


Figura 1. Sistema propuesto de seguimiento solar en 2D.

## Metodología

Para determinar los ángulos de referencia, el cálculo de  $GS$  es indispensable (López *et al.* 2015), para esto se requiere de una base de tiempo proporcionada por el *RTC*, obteniendo datos tales como; hora, minutos, segundos, día, mes y año, empleados para determinar si se encuentra en año bisiesto y el día juliano. Estableciendo a partir de estos datos la longitud de referencia ya sea de verano o invierno.

Mediante *Spencer* (Ec.1) se obtiene la ecuación del tiempo ( $ET$ ) en minutos ( $min$ ), diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo universal. Donde  $\Gamma$  se determina en función del día juliano  $n$  (Ec. 2).

$$ET = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (1)$$

$$\Gamma = 2\pi \frac{n-1}{365} \quad (2)$$

El Tiempo Solar Verdadero ( $TSV$ ) no puede emplearse directamente de la base del *RTC*, debido a que la rotación de la tierra varía a lo largo del año, es decir los días no duran exactamente 24 h. Evaluando la ecuación 3 se obtiene  $TSV$ , donde  $UTC$  es el Tiempo Universal Coordinado,  $UH$  el Uso de Horario local,  $l_{std}$  Longitud estándar del lugar de donde se deseen realizar los

cálculos y  $l_{local}$  es la Longitud donde se encuentra el lugar que se desee realizar los cálculos.

$$TSV = (UTC + UH) + \left( \frac{l_{std} - l_{local}}{15} \right) + \left( \frac{ET}{60} \right) \quad (3)$$

El ángulo horario ( $W$ ) proporciona los grados en que se encuentra ubicado entre el plano meridiano del observador y del Sol, depende de la hora del día, cuando es mediodía el ángulo horario es  $0^\circ$ , mientras que si es en la mañana el ángulo es negativo y positivo cuando es en la tarde. Se puede obtener  $W$  mediante la Ec. 4.

$$w = 15(TSV) - 180 \quad (4)$$

La declinación ( $\delta$ ) representa el ángulo que forma la línea que une el centro de la Tierra y el centro del Sol con el plano del ecuador celeste. Éste varía entre los rangos siguientes:  $-23.45^\circ$  y  $23.45^\circ$ . La expresión más exacta y utilizada es la ecuación de *Cooper* la cual se expresa (Ec. 5):

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360^\circ (n + 284)}{365} \right] \quad (5)$$

La altura solar máxima ( $h$ ) es la posición máxima que el sol llegará a las

doce horas solares en un día determinado, y se determina mediante Ec. 6, donde  $\phi$  es la latitud del lugar, en nuestro caso Chihuahua con  $28.63^\circ$ .

$$h = 90^\circ - (\phi - \delta) \quad (6)$$

El ángulo horario ( $w_s$ ) de puesta y salida del sol corresponde a la aparición y desaparición del Sol en el plano del horizonte. Sus valores absolutos son idénticos. Para la mañana el resultado  $w_s$  se multiplica por  $-1$ , mientras que para la tarde  $w_s$  se multiplica por  $+1$ . Se puede obtener mediante Ec 7:

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (7)$$

La hora de puesta y salida del sol representa el ángulo horario convertido en horas correspondiente a la aparición y la desaparición del Sol en el plano del horizonte. Para conocer la hora en la que sale el sol se elige el negativo y para la puesta de sol se elige positivo, tomando que  $w_s$  no tiene ningún cambio

(es decir no se multiplica por  $-1$  ó  $+1$ ). Se obtiene mediante Ec. 8:

$$H_s = 12 \pm \frac{w_s}{15} \quad (8)$$

La altura solar ( $\alpha$ ) para cualquier hora del día se puede obtener mediante Ec. 9:

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \begin{array}{l} \sin \delta \sin \Phi \\ + \cos \delta \cos \Phi \cos w \end{array} \right) \quad (9)$$

Conociendo las variables de geometría solar;  $ET$ ,  $TSV$ ,  $w$ ,  $\delta$ ,  $h$ ,  $w_s$ ,  $H_s$  y  $\alpha$  (figura 2), se puede obtener el ángulo de referencia azimutal ( $\Psi_r$ ) mediante Ec. 10 y el ángulo de referencia de elevación ( $E_r$ ) con Ec. 11 en función de  $\alpha$ .

$$\Psi_r = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \alpha \sin \Phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \Phi} \right) (\pm 1) \quad (10)$$

$$E_r = 180 - (90 + \alpha) \quad (11)$$

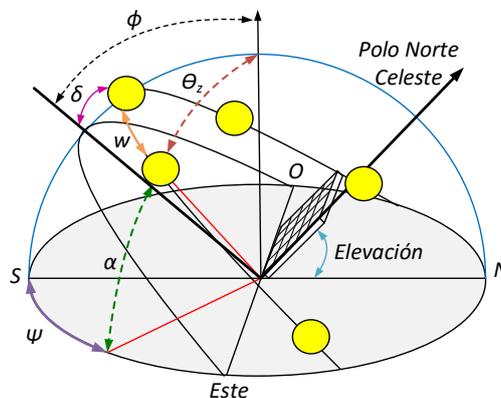


Figura 2. Ángulos de geometría solar.

El ángulo azimutal es el que forma el segmento observador-sur con la proyección vertical sobre el plano horizontal del segmento observador-posición-solar (figura 2). Si este ángulo está situado de Sur a Este, se considera negativo, y si está situado de Sur a

Oeste, se considera positivo. Mediante  $\Psi$  y  $\alpha$  se puede conocer la posición del Sol en cualquier momento del día. En tanto a  $GS$ , se puede obtener en Ec. 12 el ángulo cenital ( $\Theta_z$ ), que es complementario con  $\alpha$ .

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (12)$$

En la figura 3 se puede apreciar la sección del algoritmo de flujo que contiene el ATmega2560 para el cálculo de los ángulos de referencia  $\Psi_r$  y  $E_r$ , en

el cual se puede notar que se realiza una corrección en cuanto a la longitud estándar, es decir si es verano se tendrá un valor de  $90^\circ$ , caso contrario de  $105^\circ$ . Además, de determinar si es año bisiesto para el cómputo del día juliano.

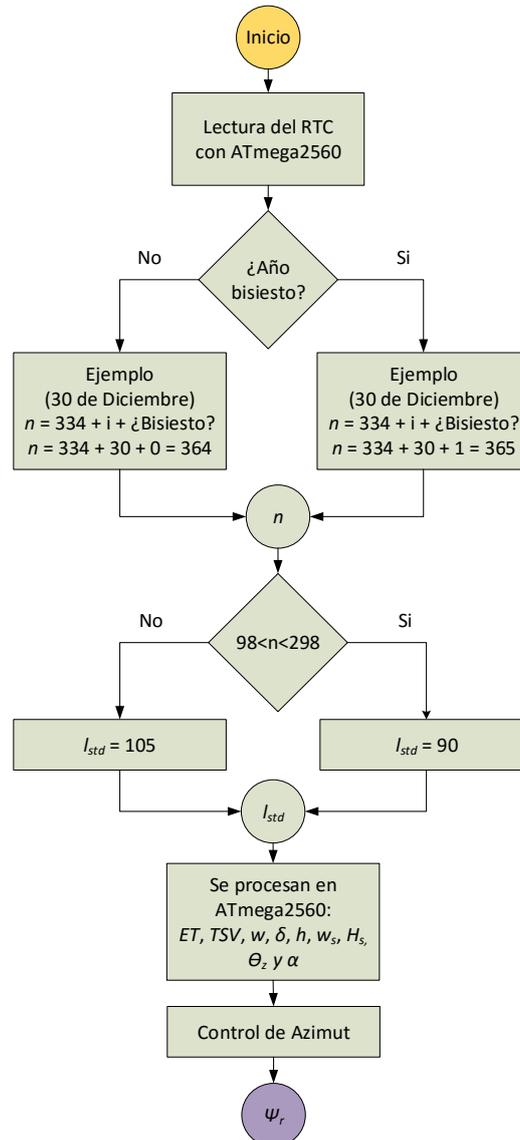


Figura 3. Diagrama de flujo para GS.

La sección del control del ángulo azimutal y de elevación se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 4 y 5, en la cual se determina el ángulo de referencia  $\Psi_r$  y  $E_r$  en función de los ángulos obtenidos por GS. La

lectura del ángulo actual  $\Psi$  y  $E$  se realiza mediante el IMU, relacionando ambos valores mediante un control de ventana de  $\pm 4^\circ$  para determinar la acción de control necesaria en el motor a pasos y el actuador lineal.

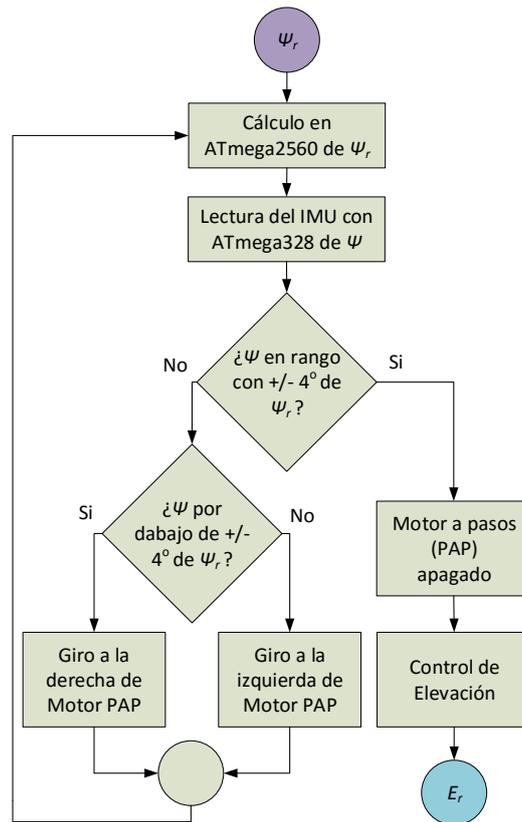


Figura 4. Diagrama de flujo de control para ángulo de azimut.

Manteniendo de esta forma la radiación solar perpendicularmente al área de captación. Antes de volver a iniciar el ciclo en el Microcontrolador, los datos de *GS* e *IMU* son transferidos a una interfaz *HMI* desarrollada en LabVIEW,

con la finalidad de monitorear el estado del sistema de seguimiento en *2D*. En la figura 6 se puede apreciar el esquema a bloques de control para el ángulo azimutal y de elevación empleando un controlador tipo ventana.

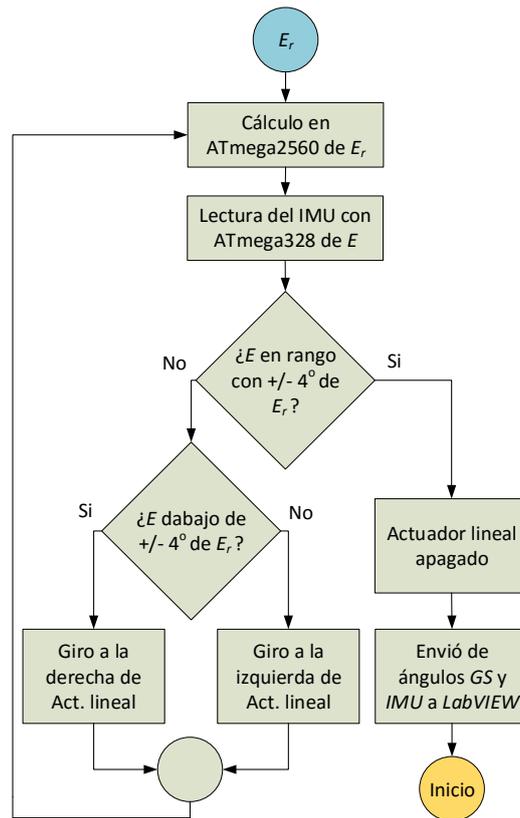


Figura 5. Diagrama de flujo de control para ángulo de elevación.

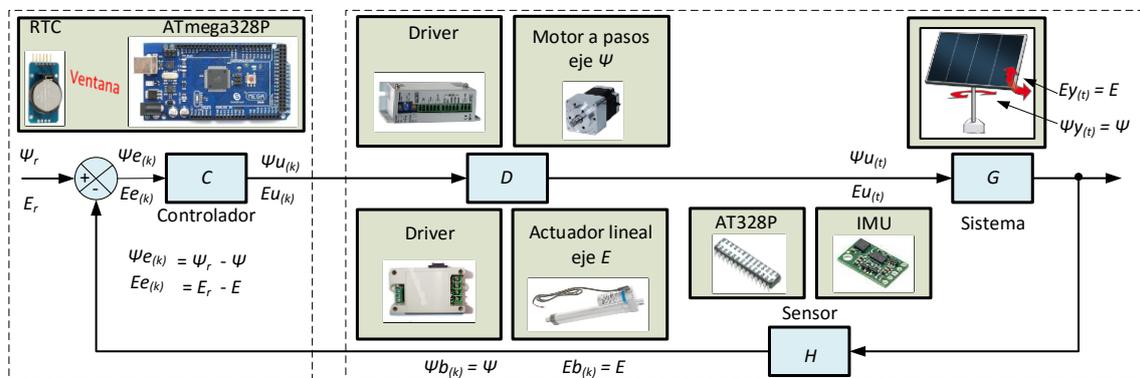


Figura 6. Diagrama de bloque del control azimutal y de elevación.

En la figura 7 se puede apreciar el diseño de la estructural en *Solidworks* del sistema de seguimiento en 2D.

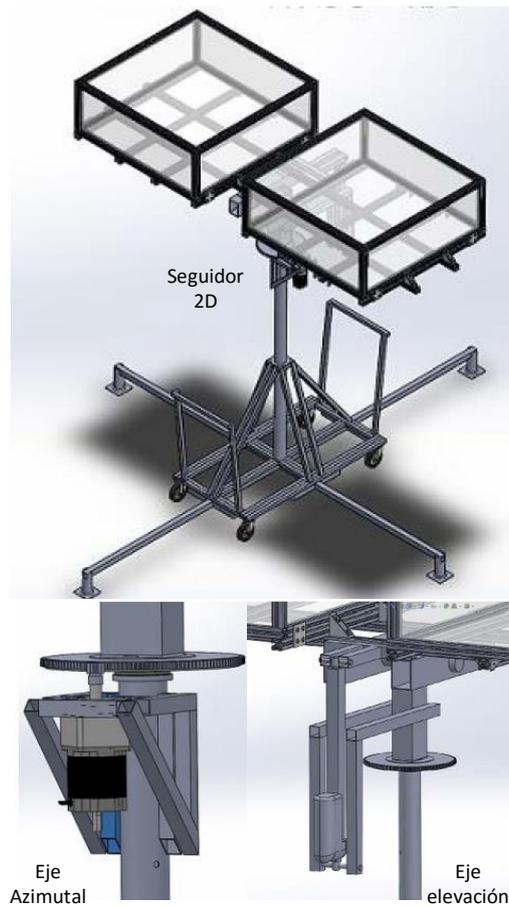


Figura 7. Diseño estructural del seguidor Solar 2D.

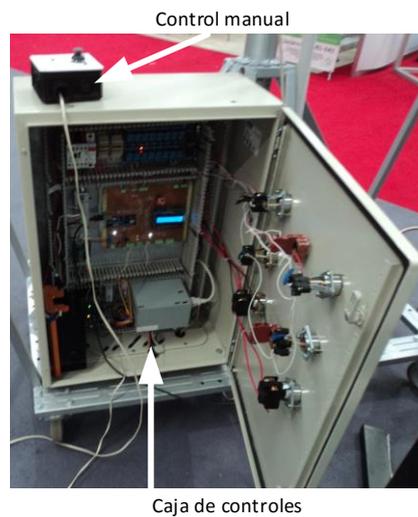


Figura 8. Caja de controles del sistema.

Para el movimiento azimutal se empleó un volante de motor de una camioneta Ford 300 para usarse como engrane de transmisión de fuerza para el motor de

pasos modelo a200k-m599-7.2. Además un actuador lineal a 12 V con elongación de 0.5 m para el movimiento del ángulo de elevación. El sistema de

controles se puede apreciar en la figura 8, en el cual se diseñó una placa en circuito impreso para integrar los dispositivos eléctricos presentados en la figura 1. Además de contar con panel de control manual/automático y un paro de energía con lámparas indicadoras de

estado. De acuerdo con el diseño mostrado en figura 7, el prototipo construido de un sistema de seguimiento en 2D se puede apreciar en la figura 9, en el cual se desarrollaron pruebas experimentales del desempeño del controlador.



Figura 9. Prototipo de sistema de seguimiento Solar 2D.

La interfaz de monitoreo *HMI* se puede observar en la figura 10, la cual consiste en instrumentos de medición que registran los ángulos referencia azimutal y de elevación, así como los actuales. El programa consiste en leer una cadena de datos que contiene identificadores

específicos mediante letras, y a través de funciones avanzadas de manejo de cadenas en *LabVIEW* se separa para extraer el dato de interés que proviene por puerto serial desde el Microcontrolador ATmega2560.

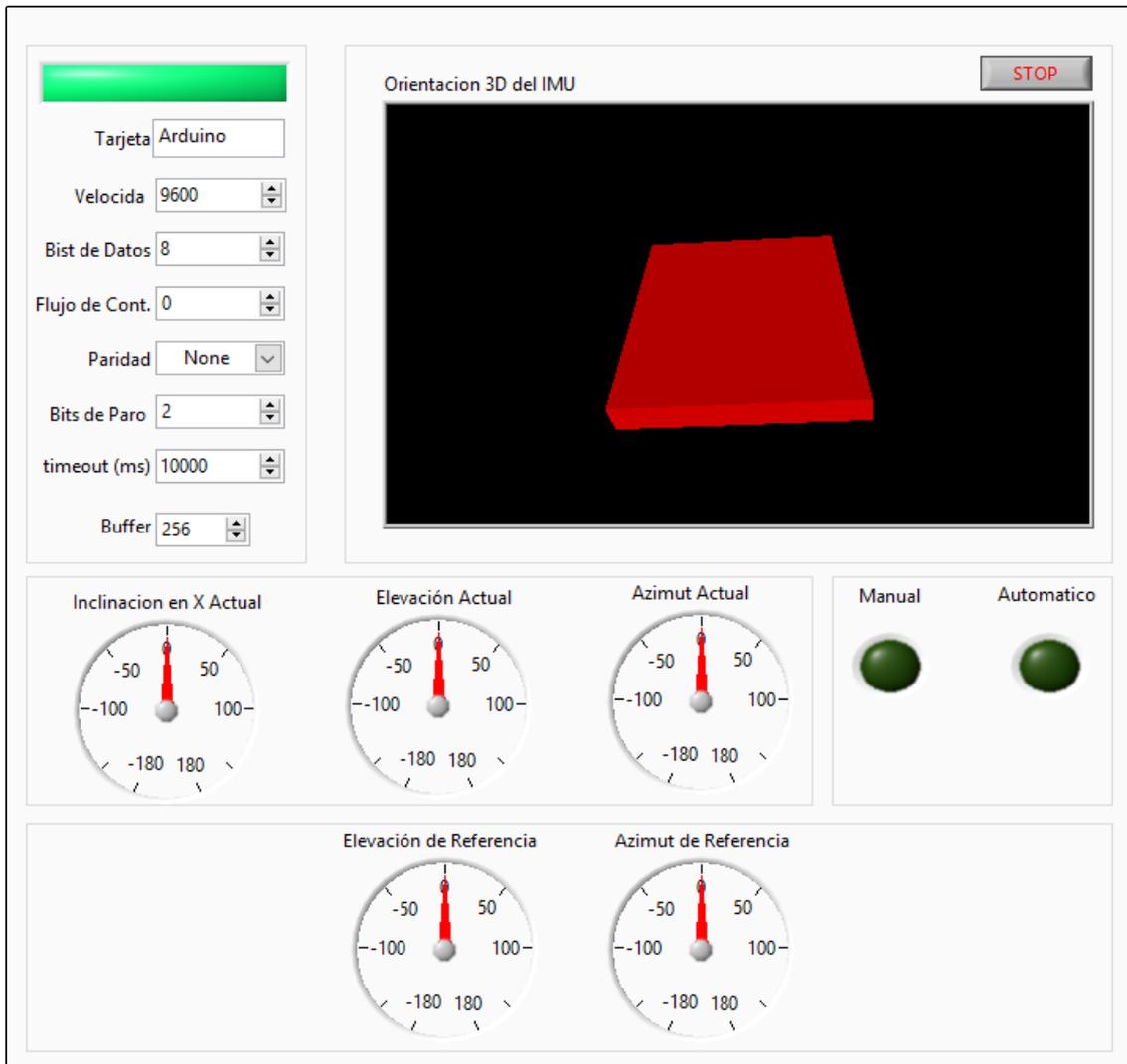


Figura 10. Interfaz de monitoreo *HMI*.

## Resultados

Para el proceso de validación de los algoritmos de *GS* implementados en el Microcontrolador *ATmega2560*, se tomó como recurso la página web <http://alcazaren.com/rs/node/748> la cual determina ciertos ángulos, tales como el azimut y altura solar. Considerando las 10.0189 horas, además, de los datos de latitud y

longitud de la Ciudad de Chihuahua (28.616667 y -106.066666) introducidos en la página web y en el Microcontrolador, se observan en la figura 11 los ángulos de  $\Psi$  y  $\alpha$ , en los cuales se tiene una mínima diferencia de  $0.2456^\circ$  y  $0.35^\circ$  respectivamente. Los datos del Microcontrolador se presentaron en un hiperteminal.

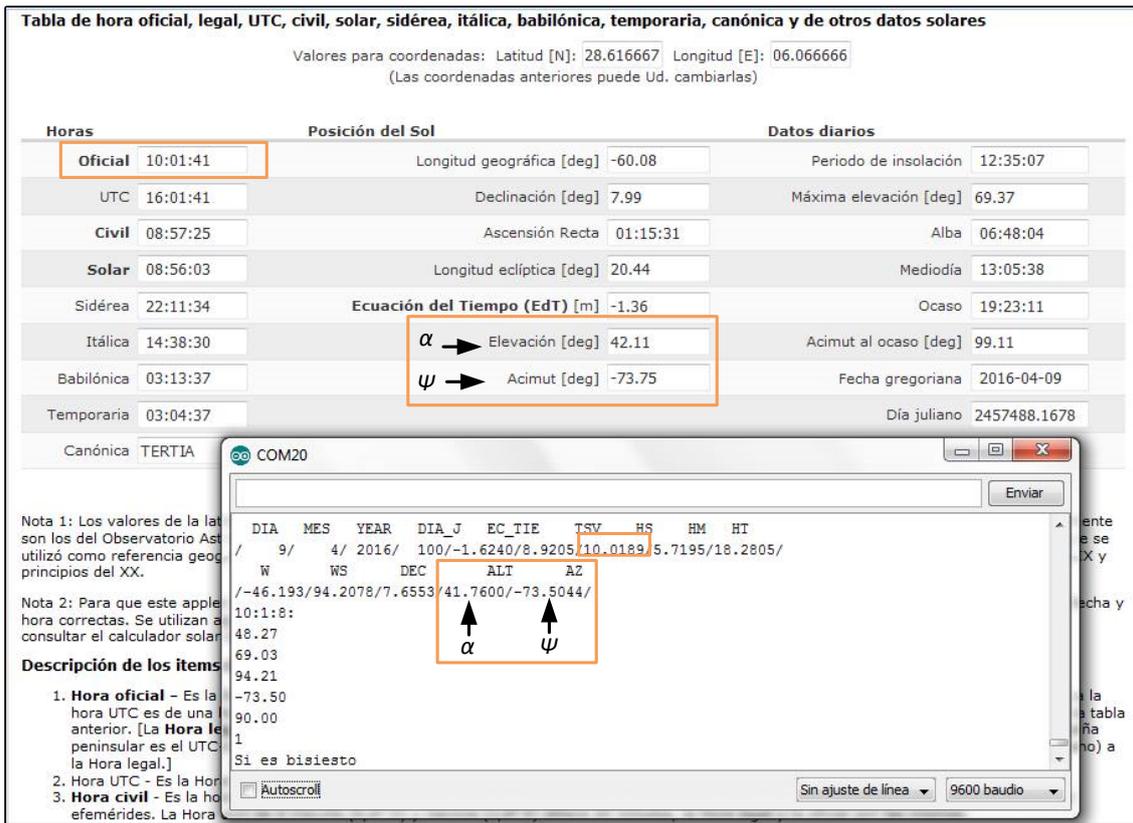


Figura 11. Validación de resultados del algoritmo de GS.

La tabla 1 muestra los promedios de error en la base del tiempo y el ángulo azimutal que se obtuvieron para la toma de 3 intervalos de tiempo, tomando en cuenta los mismos valores de latitud y

longitud. Es notorio que el promedio de error es muy bajo, por tal motivo podemos dictaminar que el desempeño del algoritmo en el Microcontrolador es aceptable.

Tabla 1. Pruebas experimentales del desempeño del algoritmo.

Página Hora (h)	ATmega2560 Hora (h)	Error (h)	Página Azimut (°)	ATmega2560 Azimut (°)	Error (°)
11.5069	11.4942	0.0127 (0.11 %)	-52.05	-51.91159	0.13841 (0.26 %)
11.5833	11.5744	0.0089 (0.07 %)	-50.41	-50.2104	0.1996 (0.39 %)
11.6667	11.6569	0.0098 (0.08 %)	-48.54	-48.3732	0.1668 (0.34 %)
Promedio		0.0665 (0.09 %)	Promedio		0.16827 (0.33 %)

## Conclusiones y Recomendaciones

Se construyó una estructura para aplicaciones de seguimiento solar en 2 ejes a base de acero inoxidable, además de una caja de controles con posibilidad de operar el sistema en modo manual o automático. Un *LCD* y una interfaz *HMI* por medio de LabVIEW permiten ver el estado del proceso. Se implementaron las ecuaciones de geometría solar en el Microcontrolador ATmega2560 para el cómputo de los ángulos de referencia, los cuales resultan ser la base para el controlador de ventana que arroja las acciones de control necesaria para mantener el área de captación perpendicular a los rayos del Sol. El cálculo de los ángulos de *GS* procesado en el Microcontrolador, se validó con la página web de *Villa de Alcazarén* logrando registrar un margen de error de 3.99 minutos (0.09 %) y 0.16827° (0.33 %) en promedio (tabla 1), Lo cual no afectó significativamente al posicionamiento de los ejes para alcanzar a colocar el área de captación cercana a 90° con respecto a los rayos incidentes del sol. Esto se comprobó mediante la colocación de un objeto en el área de captación, el cual no proyectó

sombra alguna significativa, es decir los rayos del sol incidían en forma paralela al objeto. Este experimento contribuyó a validar la capacidad que el sistema presenta al encontrar el posicionamiento adecuado de los ejes con un margen de error de +/-4° debido al control de ventana que se implementó.

El sensor *IMU* permitió orientar el sistema a través de los 360° en el eje azimutal y 90° en el eje de elevación, a pesar de que se presentaron condiciones de no visibilidad del Sol, esto debido a que el sensor emplea un compás magnético que se orienta con los campos magnéticos de la tierra para determinar el ángulo azimutal. En el caso del ángulo de elevación, el *IMU* emplea acelerómetros y giroscopios. Debido al compás magnético, es recomendable no operar el sistema dentro de instalaciones y/o cerca de materiales magnéticos, además, de estar calibrando el sistema cuando se cambia de un lugar a otro.

### Agradecimientos

El presente proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo de PRODEP (Programa para el Desarrollo Profesional Docente) en el rubro de fortalecimiento de Cuerpos Académicos

(CA), además de la incansable participación de del grupo de docentes y alumnos que conformar el CA.

### Referencias Bibliográficas

SENER. “Prospectiva del sector eléctrico,” *Secretaría de Energía*, consultada por Internet el 10/04/2016, Sitioweb: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva del Sector Electrico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf).

Mendieta T. (2007). Diseño, construcción, control y automatización de un concentrador solar cilindro-parabólico. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, sitio web: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/1669/1/TESISperezmontes.pdf>

Chou T.L. Shih Z. H. Hong H.F. Han C.N. Chiang K.N. (2012). Thermal performance assessment and validation of high-concentration photovoltaic solar cell module. *Packaging and Manufacturing Technology*, (4), 578 – 586.

Santhosh K.V. Dutta T. Rajshekar J.S. (2013). 2 D tracking system for solar panels using SVM implemented by motion assistant of LabVIEW. *Signal Processing Image Processing & Pattern Recognition (ICSIPR)*, 243 – 247.

Sharma P. Wilkins M. Schriemer H. Hinzer K. (2015). Optimization of three and four junction solar cell CPV systems using ray tracing and SPICE modeling. *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1-6.

Mahmood O.T. (2013). Programmable logic controller based design and implementation of multiple axes solar tracking system. *Electrical, Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE)*, 10-106.

Malge S. Bhole K. Narkhede R. (2015). Designing of dual-axis Solar tracking system with remote monitoring. *Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, 1524 – 1527.

Haryanti M. Halim A. Yusuf A. (2014). Development of two axis solar tracking using five photodiodes. *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, 40-44.

Zhang X. Li X. Lu K. (2012). Research on an intelligent solar tracking system based on

LPC2131. *Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC)*, 429.432.

Kassem A. Hamad M. (2011). A microcontroller-based multi-function solar tracking system. *Systems Conference (SysCon)*, 13-16.

Sohag H.A. Hasan. Khatun M. Ahmad M. (2015). An accurate and efficient solar tracking system using image processing and LDR sensor. *Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, 522-527.

López H. Pérez A. (2015). Sistema electrónico para el seguimiento de la trayectoria solar. Consultada por Internet el 10/04/2016, Sitio web: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/9544/1/TesisSeguidor.pdf>