

SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES PARA HELIÓSTATO

R. Casimiro, M. Gea, D. Hoyos y C. Placco

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: rsc9421@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 21/09/18

RESUMEN: Se presenta el desarrollo de un sistema de seguimiento solar en dos ejes para el control del movimiento de los heliostatos de un horno solar para tratamiento de minerales a altas temperaturas. A partir de un análisis utilizando geometría solar se encontraron las ecuaciones que determinan las posiciones angulares de azimut e inclinación de los reflectores para cada instante. Se elaboró una rutina de cálculo que utiliza estas ecuaciones y permite controlar el movimiento de motores paso a paso. Se diseñó y construyó un sistema electrónico para el control numérico de los pasos de los motores para el seguimiento solar y para rebatimiento del plano ante alarma de ráfagas de viento intensas. Se ensayó el sistema a través de un prototipo de pequeña escala.

Palabras clave: energía solar, seguidor de dos ejes, heliostatos.

INTRODUCCIÓN

Para las empresas mineras de la Puna, localizadas lejos de la red de gasoductos, el desarrollo de sistemas productivos que involucren procesos térmicos está limitado, debido al alto costo de transporte de los combustibles. A su vez, estas plantas están ubicadas en una de las regiones con mayor insolación del mundo, la Puna de Atacama, lo que hace que la energía solar sea el principal recurso energético local.

La empresa Ulex S.A. en su planta en la mina Sol de Mañana en el Departamento de Los Andes, provincia de Salta, construyó y ensayó un primer prototipo de horno solar. El mismo está formado por un conjunto de heliostatos (grandes espejos planos) que reflejan la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico, y éstos, a su vez, sobre un recinto térmico, donde se procesa el mineral a alta temperatura (figura 1). La eficiencia de este equipo es baja debido a que se trata de un prototipo básico, con componentes artesanales y control manual (sin seguidores solares automáticos). Sin embargo el sistema permitió probar que se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C, lo que permitió realizar las primeras experiencias de separación y concentración de colemanita (borato de calcio) mediante calcinación y decrepitación del mineral.

La comprobación, a partir de estos ensayos preliminares, de que es posible disponer de energía solar térmica para procesos industriales de alta temperatura en la propia localización de la explotación, abre nuevas posibilidades de agregar valor económico a algunos minerales de importancia en la producción regional, como es el caso de algunos boratos y de la perlita. Los mismos poseen un alto contenido de agua en su estructura y, cuando son calentados hasta altas temperaturas la liberan, mejorando sus propiedades desde el punto de vista comercial.

Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

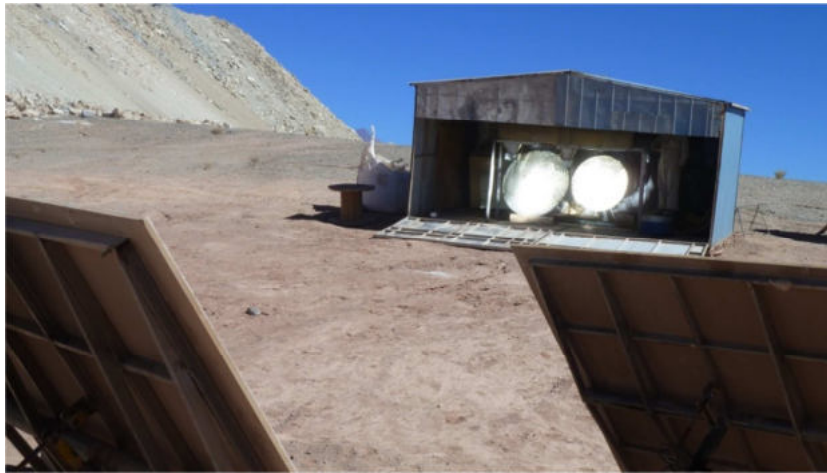


Figura 1: Primer prototipo de horno solar en la Puna salteña. Espejos planos reflejando la radiación solar sobre concentradores secundarios de disco parabólico.

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que tiene como objetivo el desarrollo de la tecnología de Horno Solar a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico. Éste consiste en un sistema formado por un conjunto de heliostatos que concentran la radiación en un reflector secundario. En el foco de este reflector se ubica un recinto térmico que alcanza las temperaturas requeridas para el procesamiento del mineral contenido en su interior (figura 2). Un componente clave del horno solar es el seguimiento solar automático de los heliostatos.

El desarrollo es llevado adelante por investigadores de la Universidad Nacional de Salta en conjunto con personal de una empresa minera que posee una planta productora de boratos en la Puna salteña, donde se localizará el prototipo industrial.

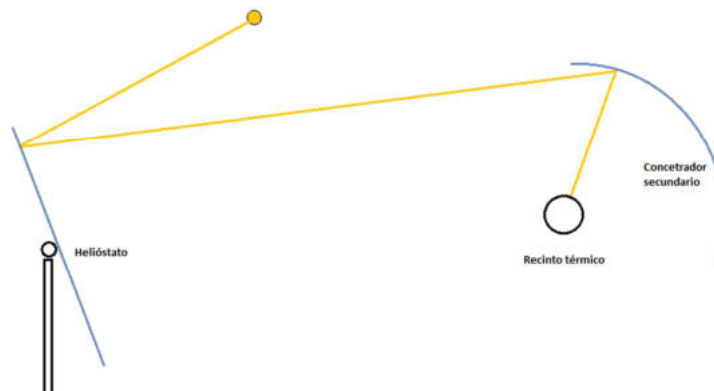


Figura 2: Esquema de un Horno Solar de alta temperatura

A fin de comenzar a desarrollar un prototipo industrial para la transferencia de tecnología, se plantea la construcción y análisis de un heliostato cuadrado de 3 m de lado, constituido por 8 facetas (figura 3). Tanto los marcos externos como los bastidores de las facetas fueron construidos con caño estructural. Cada faceta está vinculada a la estructura del heliostato mediante cuatro tornillos regulables que permiten dar una orientación distinta a cada una para lograr un grado de concentración inicial (canteo). Se encuentra en construcción el sistema mecánico de seguimiento que estará conformado por dos motores paso a paso, del tipo Nema 23, y dos reducciones 1:100 para los movimientos de rotación alrededor de los ejes horizontal y vertical.

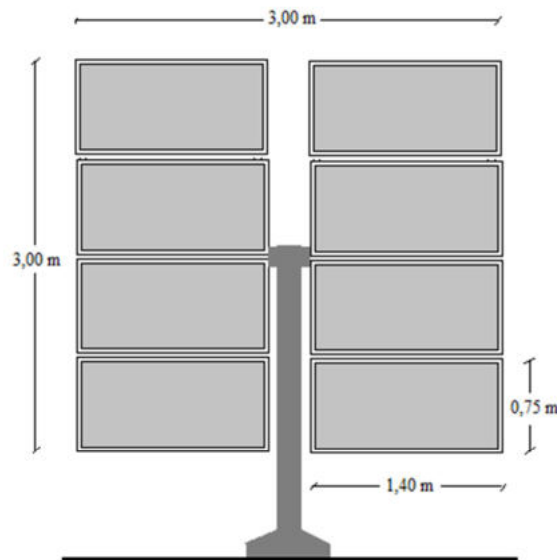


Figura 3: Esquema del helióstato de 8 facetas

FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIDOR SOLAR

El diseño de un sistema de seguimiento solar debe contar algunas características importantes como: precisión, durabilidad, fiabilidad, facilidad de mantenimiento y costo accesible. Un concepto de seguimiento es el que plantea ubicar la posición del sol en base a sensores de luz LDR duales (Wang & Lu, 2013; Ponniran et al., 2011). Este tipo de rastreadores enfrenta muchos problemas porque las mediciones del sensor de luz se ven afectadas por el polvo, excrementos de pájaros, nubosidad parcial o luz reflejada por el vidrio de las ventanas de los edificios (Al Naima et al., 2013).

Para resolver este problema, se desarrollan sistemas que ubican la posición del sol utilizando microcontroladores que utilizan ecuaciones astronómicas. Estos sistemas leen periódicamente la hora y la fecha de un controlador en tiempo real, y detectan la ubicación por GPS (Al Naima et al., 2012; Rizal et al., 2012).

Existen distintos tipos de mecanismos para el seguimiento solar. Según el tipo de movimiento que realicen, pueden ser de uno o dos ejes (grados de libertad). Las altas temperaturas involucradas en los procesos térmicos del horno solar exigen óptimos niveles de eficiencia óptica en el proceso de concentración de la radiación, minimizando las pérdidas por *desbordamiento de flujo*. En esta eficiencia influye principalmente la precisión de la orientación de los helióstatos por lo cual es necesario la implementación de seguidores en dos ejes con programación astronómica. En este tipo de seguidores existen dos grados de libertad: la rotación alrededor de un eje vertical, definida por el ángulo azimutal (γ_p) y la rotación alrededor de un eje horizontal, definida por el ángulo de elevación (β) del helióstato (figura 4).

Los seguidores de dos ejes, azimut - elevación, de programación astronómica, están asociados a costos elevados por el uso de dos motores, reductores y porque tienen cierta complejidad en su algoritmo. Sin embargo su utilización está cada vez más difundida debido a la importante mejora que genera en la eficiencia de los concentradores. Estos sistemas detectan la posición del sol con alta precisión y no tienen el problema del sensor de luz, pero aun así necesitan un sensor de realimentación para detectar si el reflector está en una ubicación exacta.

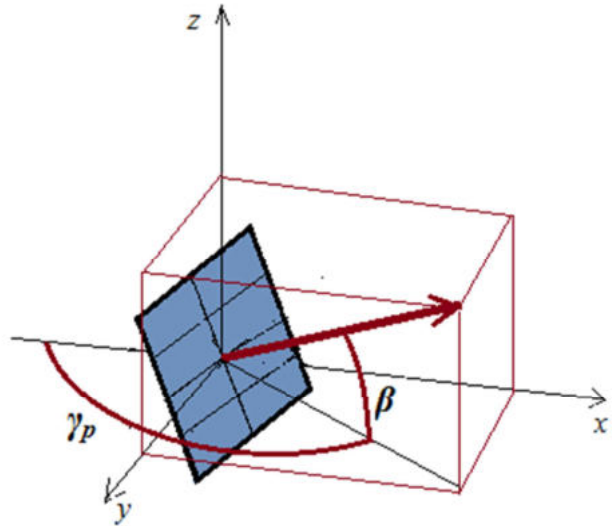


Figura 4: Definición de las coordenadas angulares del heliostato

CÁLCULOS DE LAS POSICIONES ANGULARES DEL HELIÓSTATO: AZIMUT Y ELEVACIÓN

Las relaciones básicas, que permiten determinar las coordenadas angulares del sol para cualquier punto sobre la superficie terrestre, son representadas en las ecuaciones 1 a 3 (Duffie y Beckman, 2006):

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} (360 (284 + n) / 365) \quad (1)$$

$$\Theta_z = \arccos (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \operatorname{sign} (\omega) \operatorname{arc} \cos (\cos \Theta_z \operatorname{sen} \varphi - \operatorname{sen} \delta) / \operatorname{sen} \Theta_z \cos \varphi \quad (3)$$

δ : ángulo de declinación solar

n : número de día del año

Θ_z : ángulo cenital, es el ángulo que forman la radiación directa y la vertical del lugar.

φ : latitud del lugar

ω : ángulo horario (desplazamiento angular del sol debido a la rotación de la tierra)

γ_s : azimut solar, es el ángulo que forma la proyección horizontal de la radiación directa con el meridiano del lugar.

En la figura 5 se representan las direcciones de incidencia y reflexión de la radiación solar respecto a un sistema de ejes definido de manera que la normal de la superficie del heliostato está contenida en el plano x-z. Es decir, la dirección del eje x coincide con la dirección de la proyección horizontal de la normal al plano. Este eje forma un ángulo azimutal γ_p respecto al meridiano del lugar. En el esquema de la figura 5 (a) está representada la proyección de un rayo incidente sobre el plano x-z.

Los ángulos son los siguientes:

α_{sol} : ángulo entre el azimut del sol y el azimut del heliostato ($\gamma_s - \gamma_p$).

h_{sol} : altura solar, ángulo que forma la dirección del sol respecto al plano horizontal ($90 - \Theta_z$).

h'_{sol} : proyección de la dirección de un rayo incidente sobre el plano x-z.

Se puede observar en dicho esquema que para una dada posición del sol (x,y,z), se cumple que:

$$z = x \operatorname{tg} (h'_{sol}) = d \operatorname{tg} (h_{sol}) \quad (4)$$

$$x = d \cos (\alpha_{sol}) \quad (5)$$

$$h'_{sol} = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} (h_{sol}) / \cos (\alpha_{sol})) \quad (6)$$

En el esquema de la figura 5 (b) está representada la proyección de un rayo reflejado hacia el absorbedor sobre el plano x-z, cuya dirección respecto al helióstato es γ_{abs}
 α_{abs} : ángulo entre el azimut del absorbedor y el azimut del helióstato ($\gamma_{abs} - \gamma_p$).
 h_{abs} : ángulo que forma la dirección del absorbedor respecto al helióstato y el plano horizontal.
 h'_{abs} : proyección de la dirección de un rayo reflejado sobre el plano x-z.

Análogamente al caso de la incidencia, en la reflexión se puede plantear que:

$$z = x \operatorname{tg} (h'_{abs}) = d \operatorname{tg} (h_{abs}) \quad (7)$$

$$x = d \cos (\alpha_{abs}) \quad (8)$$

$$h'_{abs} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{tg} (h_{abs}) / \cos (\alpha_{abs})) \quad (9)$$

Planteando que la dirección de la normal al plano es bisectriz entre los rayos incidentes y reflejados se puede obtener el ángulo de inclinación del helióstato β :

$$\beta = (h'_{sol} + h'_{abs}) / 2 \quad (10)$$

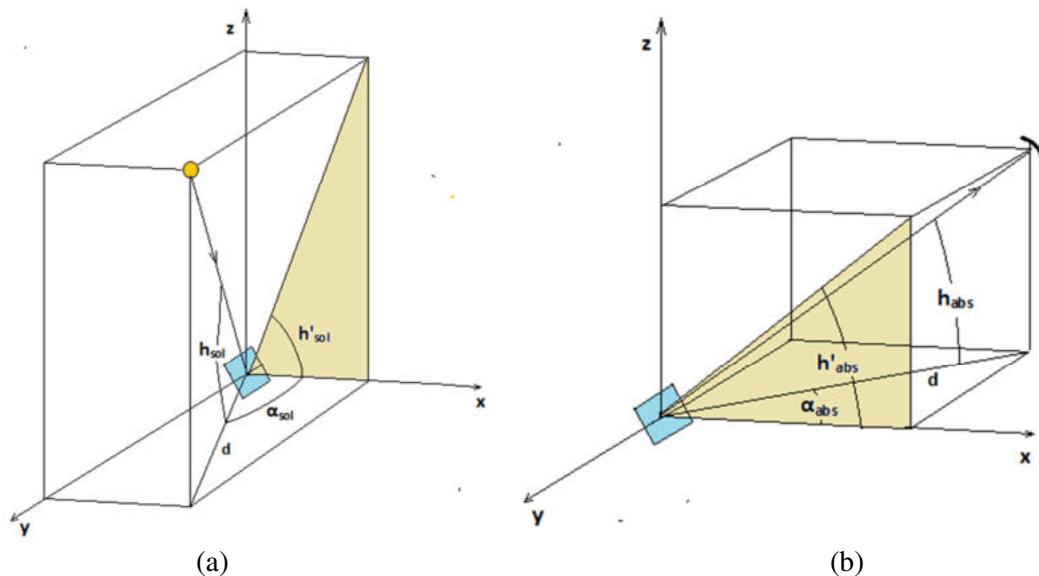


Figura 5: Proyecciones sobre el plano normal al helióstato: a) de un rayo incidente, b) de un rayo reflejado

En cuanto al cálculo del azimut del plano, éste debe ser bisectriz entre el azimut del sol y la dirección de la proyección horizontal de la línea que une el heliostato con el absorbedor (figura 6):

$$\gamma_p = (\gamma_s + \gamma_{abs}) / 2 \quad (11)$$

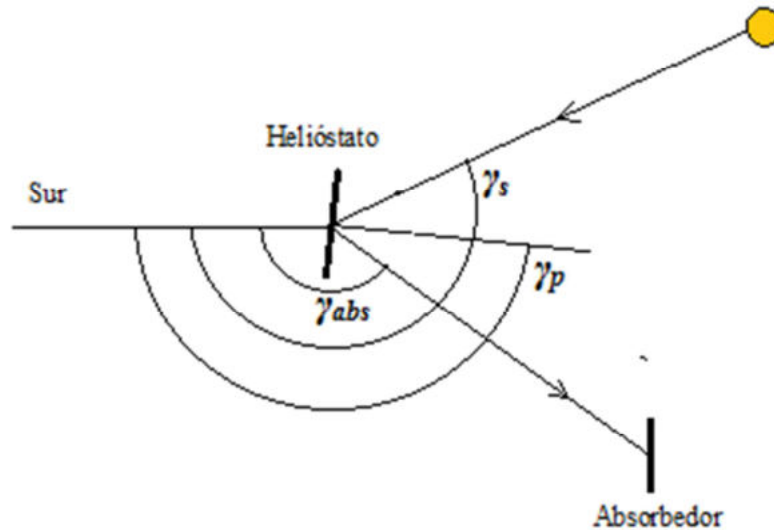


Figura 6: Proyección en planta - ángulos azimutales

La determinación de los valores que deben tomar en cada instante los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada heliostato para reflejar la radiación solar a un punto fijo (absorbedor) en su movimiento de seguimiento al sol durante el día, para cualquier época del año se puede realizar con la siguiente secuencia de cálculo:

- Cálculo del ángulo de declinación solar para un determinado día del año con la ecuación (1)
- Cálculo del ángulo cenital Θ_z una vez definidos n , la latitud del lugar y el momento del día con la ecuación (2).
- Cálculo del azimut solar γ_s con la ecuación (3).
- Determinación de las coordenadas angulares del absorbedor respecto del heliostato en estudio γ_{abs} y h_{abs}
- Cálculo de la inclinación β con las ecuaciones de (6), (9) y (10)
- Cálculo del azimut del plano γ_p con la ecuación (11)

SEGUIDOR SOLAR CON ARDUINO

Con la llegada de los microcontroladores Arduino y el hardware asociado para controlar motores, incluyendo motores paso a paso, ha habido un considerable interés en el uso de este dispositivo de código abierto y de bajo costo para el desarrollo de seguidores solares. El problema potencial para el entorno informático Arduino es su capacidad para el uso de ecuaciones trigonométricas de varios términos.

Algunos seguidores utilizan un sensor angular analógico como sensor de realimentación que se conecta al colector solar en ambos ejes. Este sensor tiene partes móviles y lo que genera una baja durabilidad. Otros seguidores usan el codificador integrado del motor de CC dentro de los actuadores lineales. Este sistema cuenta los pulsos de retroalimentación del codificador para calcular la ubicación actual del reflector, pero también se genera un problema con esta técnica cuando se necesita restablecer el actuador lineal cada vez que se reinicia el seguidor ya que no hay una forma directa de conocer la ubicación actual del reflector.

Por lo mencionado anteriormente, en el presente desarrollo, se optó por el uso de un sensor óptico tipo horquilla FZ0888, el cual permite la realización de *homing* (mover los motores al punto de origen). De esta manera, se evita la pérdida de pasos por acumulación, ya que el sistema se reinicia al final de cada día. Además, otro beneficio de usar un sensor óptico es que no tiene limitación mecánica (como sí lo tienen los finales de carrera), lo que posibilita mover el helióstato vueltas completas en cada eje.

Para hacer *homing* se mueven ambos motores hasta que el helióstato interrumpa la ranura del sensor, entonces el sensor envía una señal al microcontrolador mediante una interrupción para detener los motores, lo que significa que llegaron a su punto de referencia.

El esquema del sistema desarrollado se muestra en la figura 7. Consta de un microcontrolador que realiza el control del sistema, una placa CNC Shield encargada de dar soporte físico a los dos controles de motores paso a paso tipo A4988, un reloj de tiempo real DS3231 y dos sensores tipo FZ0888 encargados de señalar la posición inicial del sistema (*homing*).

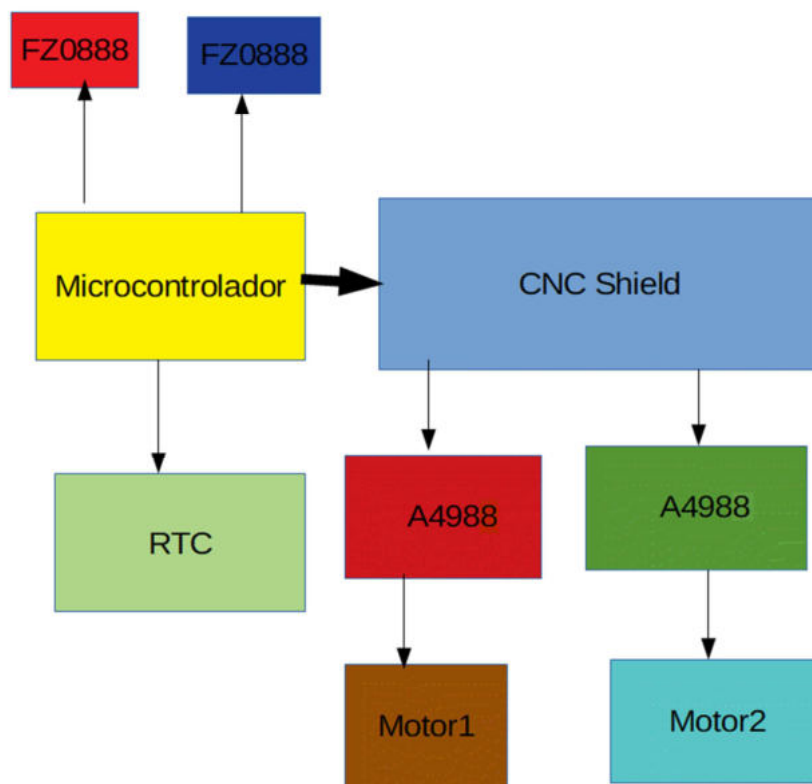


Figura 7: Esquema general del sistema

Microcontrolador:

El sistema de seguimiento usa la placa Arduino Mega 2560 como controlador principal. Esta tarjeta dispone de 54 entradas/salidas digitales, 14 de las cuales se pueden utilizar como salidas PWM (modulación de anchura de pulso). Además dispone de 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas series), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un pulsador para el *reset*.

Tarjeta de control numérico computacional

Se utilizó CNC Shield V3 (figura 8). Ésta tiene un total de 4 ranuras para *driver* A4988 para la conducción de 4 canales de motores paso a paso. Para el seguidor solar se utilizan sólo dos. Aporta el soporte físico para los controles de motor paso a paso.

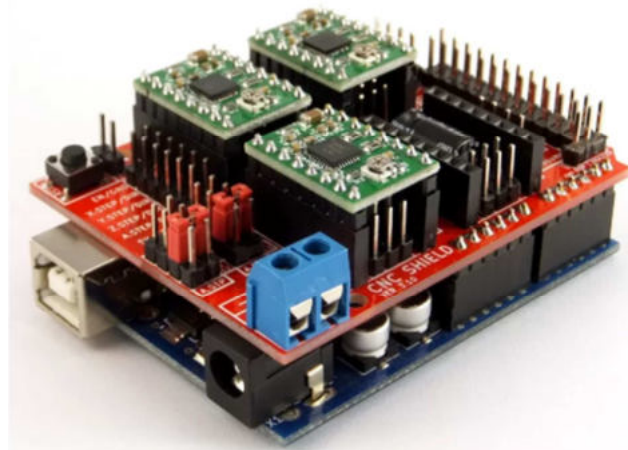


Figura 8: Placa Arduino, CNC Shield y drivers para control de motores paso a paso

Control de motor paso a paso A4988

Esta placa (figura 9) permite controlar un motor paso a paso de hasta 2 A, posee cinco resoluciones diferentes: paso completo, medio paso, cuarto de paso, octavo de paso y dieciseisavo de paso. El control se realiza de forma que cada pulso de entrada escalón corresponde a un micropaso del motor paso a paso en la dirección seleccionada por el pin DIR.



Figura 9: Pololu driver4988

Reloj de tiempo real

Controlar el tiempo en un sistema que debe moverse con precisión es de vital importancia. Para ello se usó el Reloj de Tiempo Real (RTC) DS3231, el cual se compone de un microcontrolador que cuenta el tiempo de manera precisa y, además, incorpora un sensor para compensar los cambios de temperatura que alteran los electrones del cristal de silicio. Se evita así una medición del tiempo errónea y como resultado se dispone de un reloj con una precisión de 2ppm o 1 segundo de desfajase cada 6 días. El circuito tiene una batería de litio que garantiza una alimentación continua a prueba de cortes de luz.

El RTC tiene la capacidad de ser programado para configurar la hora, el día y el año, además también se le puede programar para que envíe alarmas cada cierto tiempo (en este trabajo, cada 1 minuto). El módulo se comunica con el microcontrolador mediante bus I2C, siendo el RTC esclavo (quien envía) y el microcontrolador, maestro.

Módulo lector encoder FZ0888

La placa consta de un par fotodiodo fototransistor que detecta si algún objeto interrumpe el haz de luz entre el fotodiodo y el fototransistor lo cual permite ubicar la posición de inicio del sistema (figura 10).



Figura 10: Módulo lector encoder FZ0888

PROTOTIPO DE SEGUIDOR SOLAR EN DOS EJES

Se construyó un prototipo de seguidor en escala pequeña con el objeto de probar el funcionamiento del sistema (figura 11). Éste está compuesto por las placas y los drivers descritos anteriormente. Se utilizaron motores 28BYJ-48, los cuales tienen un paso de 5,625 grados (64 pasos por vuelta). El reductor interno tiene una relación de 1/64 y, combinados, la precisión total es de 4096 pasos por vuelta, equivalente a un paso de 0,088°. La estructura de soporte de los motores, ejes, rodamientos y espejo se construyó con una impresora 3D.



Figura 11: Fotografía del prototipo de seguidor de dos ejes.

PROGRAMA DE CONTROL DEL MICROCONTROLADOR Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El correcto funcionamiento del seguidor solar requiere los datos de día y hora de inicio, coordenadas geográficas y, además, un posicionamiento preciso del sistema: horizontal y alineado con el norte geográfico. Luego, el microcontrolador realiza las siguientes tareas.

- 1a) Configura los periféricos para el correcto funcionamiento del sistema, incluyendo *timers*, UART, interrupciones, I2C y seteando la hora y el día del reloj RTC
- 2a) Recibe la alarma que envía el RTC cada 1 minuto.

3a) Hace los cálculos de azimut e inclinación y mueve los motores la cantidad de grados correspondientes, extrapoliándolo al período de 1 minuto, para evitar inercias indeseadas que pueden provocar pérdida de pasos.

4a) Repite cíclicamente las tareas a partir del paso 2a) hasta el fin de la jornada solar y rebote el plano a la posición horizontal.

En una estación de control, se ubica un anemómetro, el cual mide la velocidad del viento. Para ráfagas de alta velocidad la estación enviará una señal mediante *wifi* al microcontrolador, el cual interrumpirá la tarea que estaba haciendo para poner el espejo horizontal, de cara hacia el suelo. Cuando disminuye el riesgo por altas ráfagas, el helióstato vuelve a su posición de colección. Se programó el microcontrolador para las siguientes tareas:

1b) Interrumpe el proceso que estaba haciendo y guarda la posición en la que recibió la alarma (mediante *encoders*).

2b) Mueve el motor que controla la inclinación del helióstato hasta la posición horizontal y permanece allí hasta recibir una nueva señal desde la estación.

3b) Con la señal de fin de ráfagas peligrosas desde la estación, el microcontrolador reanuda la tarea a partir de la posición guardada sumando los pasos correspondientes por el tiempo transcurrido en la alarma y vuelve a la tarea 2a).

Se realizaron pruebas del seguidor comprobándose un funcionamiento correcto en el seguimiento solar, acordes a la escala del prototipo. También se comprobó el rebatimiento de protección simulando la señal de alarma por viento.

CONCLUSIONES

Se construyó y ensayó un primer prototipo de seguidor solar de dos ejes en el marco del desarrollo de helióstatos de un horno solar destinado a dar respuesta a una demanda concreta de una empresa productora de boratos. Se obtuvieron los primeros resultados, los cuales se destacan a continuación.

Se encontraron las ecuaciones que permiten determinar los ángulos de inclinación β y azimutal γ_p de cada helióstato para cada instante. Estas ecuaciones fueron incorporadas en la programación, comprobándose la capacidad del microcontrolador de Arduino para utilizarlas en los cálculos.

Se obtuvo un seguimiento de gran resolución y precisión mediante el uso del micro *stepping* de los drivers A4988 y del reloj de tiempo real (RTC) DS3231. De esta manera los errores del sistema electrónico pasan a ser menores que los originados en el juego de los engranajes de los reductores mecánicos.

Se resolvió adecuadamente el control del reinicio diario que evita la pérdida de pasos por acumulación durante largos períodos. Esto se logró mediante el control de la posición horizontal de referencia con el uso de un sensor óptico tipo horquilla FZ0888.

Se encontró el algoritmo que permite interrumpir el seguimiento por riesgo de daño por vientos fuertes, rebatir el plano del helióstato y recuperar luego el seguimiento con la señal de fin de riesgo.

Se realizaron las primeras experiencias de seguimiento solar comprobando el funcionamiento esperado del equipo. Estos resultados indican que se está en condiciones de construir el sistema de seguimiento y alarma del prototipo industrial con motores y reductores en escala real, utilizando el mismo sistema electrónico.

REFERENCIAS

- Al Naima F. M., Ali R. S. and Abid A. J..“Solar Tracking System: Design based on GPS and Astronomical Equations,” IT-DREPS Conf. Exhib., pp. 1–6, 2013.
- Al Naima F. M., Ali R. S. and Abid A. J.. “Design and Implementation of a Smart Dual Axis Sun Tracker Based on Astronomical Equations,” vol. 1, pp. 1–6, 2012.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). "Solar Engineering of Thermal Processes", 3ª edición. Wiley Interscience, New York.
- Ponniran A., Hashim A. and Munir H. Ali. “A design of single axis sun tracking system,” in 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2011 - Program and Abstracts, 2011, pp. 107–110.
- Rizal Y., Wibowo S. H., and Feriyadi, “Application of solar position algorithm for sun-tracking system,” in Energy Procedia, 2013, vol. 32, pp. 160–165.
- Wang J. M. and Lu C. L.. “Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system,” Sensors (Switzerland), vol. 13, no. 3, pp. 3157–3168, 2013.

ABSTRACT: The development of a two-axis solar tracking system for movement control of the heliostats of a solar furnace for minerals treatment at high temperatures is presented. By using solar geometry equations the instantaneous angular positions of azimuth and inclination of the reflectors were found. With such equations, a calculation routine was developed allowing to control the movement of stepper motors. An electronic system was designed and built for the numerical control of the steps of the motor for tracking purposes and for refolding the tracker's plane before the alarm of intense wind gusts. The system was tested using a small-scale prototype.

Keywords: solar energy, two-axis tracker, heliostats