

# Diseño y Construcción de un Sistema Seguidor de Sol con Modelo Astronómico

Andrés Lemus Caballero  
Universidad Antonio Nariño  
e-mail: [leandres1985@gmail.com](mailto:leandres1985@gmail.com)

**Resumen** — Este artículo presenta los aspectos más importantes en el diseño y construcción de un sistema seguidor de Sol de dos ejes con modelo astronómico con capacidad de orientar un panel fotovoltaico de 80 W.

**Palabras clave** — Panel fotovoltaico, radiación solar, seguidor de Sol, coordenadas geográficas.

**Abstract** — This paper presents the most important aspects about the design and construction of a two axis sun tracker with astronomic model with capacity for positioning a 80 W photovoltaic panel.

**Keywords** — solar radiation, PV panel, geographical coordinates.

## I. INTRODUCCIÓN

Los paneles fotovoltaicos generan energía eléctrica aún en condiciones de exposición indirecta a la radiación solar, sin embargo, las condiciones óptimas de operación implican la incidencia de luz solar directa sobre su superficie. De esta manera, se ha diseñado y construido un dispositivo seguidor de Sol de dos ejes capaz de soportar y orientar un panel fotovoltaico de 80 W de tal forma que la incidencia de la radiación solar sea perpendicular a su superficie durante todo el día, en cualquier fecha y lugar. El sistema de seguimiento se compone de una estructura mecánica de soporte y orientación y un sistema de control que determina los movimientos de los motores. Para realizar el seguimiento se requiere conocer la posición del Sol en el cielo, esta se obtiene de la programación en un PC de un algoritmo astronómico que permite determinar los ángulos que definen su posición en la esfera celeste: ángulo azimut (Az) y altura solar (h). De acuerdo a esto los objetivos del proyecto se enuncian de la siguiente manera:

- Construir la estructura mecánica de seguimiento con capacidad de soportar un panel fotovoltaico de 12 Kg (aproximadamente 80 W).
- Diseñar y programar una aplicación de control en PC que permita determinar la posición del Sol en el cielo para cualquier fecha y lugar.
- Integrar la estructura de soporte y el sistema de control de tal manera que se logre el seguimiento del Sol y por lo tanto la incidencia perpendicular de la luz solar sobre la superficie del panel fotovoltaico.

## II. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto acarrea el diseño y construcción de sus dos componentes principales: la estructura de soporte y seguimiento, y el sistema de control. Por lo tanto, a continuación se describe el proceso y los criterios utilizados.

### A. Estructura del seguidor de Sol

La estructura se ha diseñado de tal manera que permite al panel instalado realizar el seguimiento en dos ejes. El movimiento en el eje vertical (orientación azimutal) se produce con el fin de alcanzar el ángulo azimut (Az). Este ángulo varía entre 0 y 359° a partir del Norte magnético del lugar y es el resultado del cómputo de la fecha, hora y las coordenadas geográficas suministradas por el usuario a la aplicación software. Así mismo, el movimiento en el eje horizontal se produce con el fin de alcanzar el ángulo de altura solar (h), que varía entre 0 y 90°. Para lograr la orientación del seguidor en el eje vertical y horizontal se ha utilizado dos motores paso a paso que transmiten potencia mecánica desde los piñones acoplados en su eje a dos engranes rectos instalados en cada eje de rotación del seguidor. La transmisión compuesta por estos engranes tiene como objetivo reducir la velocidad angular e incrementar proporcionalmente el par torsional de los motores con el fin de movilizar la carga haciendo uso de motores de bajo par a alta velocidad. La magnitud de esta conversión depende de la relación del número de dientes del engrane y el número de dientes del piñón, según [1]:

$$VR = \frac{nP}{nG} = \frac{NG}{NP} \quad (1)$$

VR = Relación de velocidad

nP = Velocidad angular del piñón en RPM

nG = Velocidad angular del engrane mayor en RPM

NG = Número de dientes del engrane mayor

NP = Numero de dientes del piñón

En la Fig. 1 se presenta una vista general de la estructura del seguidor de Sol, soporte del panel fotovoltaico.

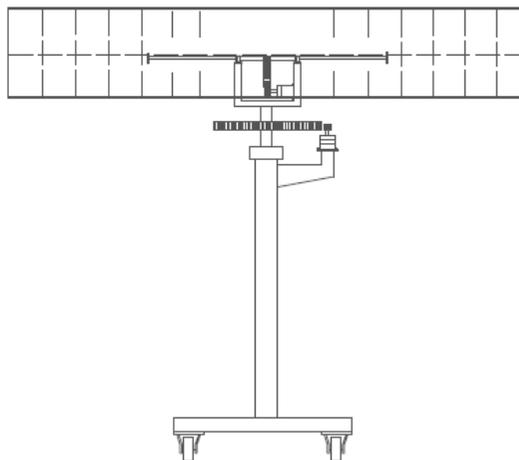


Fig. 1: Estructura del Seguidor de Sol.

## B. Cálculos

Cuando se observa el Sol desde cualquier punto sobre la superficie de la Tierra, se debe definir su posición, relativa al punto de observación o de instalación del dispositivo para realizar el seguimiento. La posición del sol relativa a este punto puede describirse mediante dos ángulos: altura solar ( $h$ ) y ángulo azimut ( $Az$ ). Entonces, la posición del Sol en el cielo se calcula mediante un algoritmo que utiliza un conjunto de ecuaciones para determinar la altura solar y el ángulo azimutal a partir de las coordenadas geográficas del lugar suministradas por el usuario. A continuación se definen las principales variables del algoritmo de cálculo:

Altura solar ( $h$ ): Es el ángulo entre el horizonte del observador y la línea de vista al Sol. Según se ilustra en el Atlas de radiación Solar de Colombia [2], la altura solar se calcula mediante (2):

$$h = \text{sen}^{-1}(\text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)) \quad (2)$$

Dónde:

$\delta$  = Declinación solar, es la posición angular del Sol a medio día (cuando el sol esta sobre el meridiano local), con respecto al plano del ecuador.

$\phi$  = Latitud, coordenada geográfica que representa la distancia angular hacia el Norte o Sur del ecuador.

$\omega$  = Ángulo horario, es el ángulo formado en el polo por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del Sol.

Ángulo Azimut ( $Az$ ): En [2] se presenta una expresión para determinar el ángulo azimut solar, según se muestra en (3):

$$\cos \alpha \text{sen} A = -\cos \delta \text{sen} \omega \quad (3)$$

Solucionando (3) para un resultado no verificado  $A'$ , se tiene:

$$A' = \text{sen}^{-1}\left(\frac{-\cos \delta \text{sen} \omega}{\cos \alpha}\right) \quad (4)$$

Donde si:  $\cos \omega \geq \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \quad (5)$

Entonces:  $A = 180^\circ - A' \quad (6)$

ó  $\cos \omega \leq \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi}\right), \quad (7)$

y  $A = 360^\circ + A' \quad (8)$

Tiempo solar verdadero

La hora solar verdadera se utiliza para el cálculo de los ángulos solares ( $Az$  y  $h$ ), pero esta no coincide con la hora local estándar. Por lo tanto, es necesario convertir la hora estándar a hora solar verdadera. Esto se debe a la diferencia entre la longitud del meridiano del observador y el meridiano en el cual se basa la hora local del país. La hora solar verdadera se calcula mediante:

$$TSV = TLE + 4(L_s - L_l) + Et \quad (9)$$

La ecuación del tiempo  $Et$  se define como la diferencia en minutos entre el tiempo solar verdadero (TSV) y el tiempo local estándar (TLE), el cual varía diariamente en un

intervalo pequeño entre -14 y 16 minutos. Spencer [3] desarrolló la ecuación (10) para determinar  $Et$  cualquier día del año con un error menor a 0,5 minutos.

$$Et = (229,2)(0,000075 + 0,001868 \cos \alpha - 0,032077 \text{sen} \alpha - 0,014615 \cos(2\alpha) - 0,04089 \text{sen}(2\alpha)) \quad (10)$$

Dónde:

$\alpha$  = Posición angular de la tierra en la órbita. Se calcula mediante (11).

$$\alpha = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (11)$$

## C. Aplicación de control en PC

Para realizar los cálculos, mostrar resultados al usuario y determinar las acciones necesarias para ejecutar la corrección de posición de los ejes de giro de los motores se ha creado una aplicación en LabVIEW®, un ambiente de programación gráfica para el procesamiento de datos en el que se han programado las ecuaciones mencionadas anteriormente para obtener los ángulos que definen la posición del sol, altura solar ( $h$ ) y ángulo azimut ( $Az$ ).

A partir de la configuración de fecha y hora del PC y las coordenadas geográficas del lugar suministradas por el usuario y en función del ángulo de paso de los motores, el programa determina la cantidad de pulsos necesarios para lograr que la normal al plano del panel alcance los ángulos de posición actual del Sol ( $h$  y  $Az$ ) en los dos ejes de seguimiento. Esta información se envía por el puerto serie del PC a una tarjeta de comunicaciones, cuyo componente principal es un microcontrolador PIC 16f873A. Esta tarjeta transmite los pulsos a los motores a través de dos circuitos de potencia que amplifican la capacidad de corriente del microcontrolador y lo aíslan de los motores mediante optoacopladores. Los motores, acoplados mediante engranes a los ejes de giro de la estructura, guían el movimiento del panel fotovoltaico instalado sobre esta de manera que la incidencia de la luz solar sobre su superficie sea perpendicular durante todo el día. En la Fig. 2 se muestra el modelo de control.

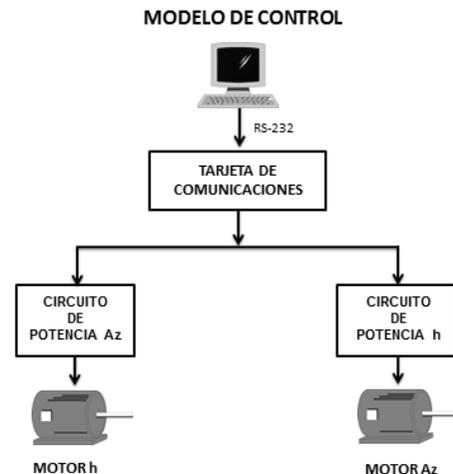


Fig. 2: Interfaz de usuario.

La configuración de tiempo del PC debe coincidir con la fecha y hora del lugar de instalación del dispositivo seguidor de Sol, ya que la aplicación desarrollada toma estos datos para determinar los ángulos  $h$  y  $Az$ .

Al ejecutar la aplicación software, el usuario debe ingresar las coordenadas geográficas de latitud y longitud en grados sexagesimales. Entonces, la aplicación actualiza el valor de los ángulos de altura solar (h) y ángulo azimutal (Az) en las casillas marcadas y ejecuta las acciones necesarias para corregir la orientación de la estructura y por lo tanto del panel solar. La Fig. 3 ilustra la interfaz de usuario de la aplicación de control.



Fig. 3: Interfaz de usuario.

### III. RESULTADOS

Se integró la estructura mecánica de seguimiento con el sistema de control y se logró que a partir de las coordenadas de posición suministradas por el usuario, obtenidas de un dispositivo GPS, el sistema realice el seguimiento del Sol y por lo tanto que el panel fotovoltaico reciba luz solar directa durante todo el día. Durante las pruebas se utilizó un panel solar de 12 Kg y 80W.

### IV. CONCLUSIONES

El cálculo de la posición del Sol en el cielo mediante un algoritmo astronómico disminuye el costo del seguidor de Sol ya que se obvia el uso de sensores, algunos circuitos y se simplifican las rutinas de comunicación entre el microcontrolador y el PC.

Mediante el uso de LabVIEW® se desarrolló una aplicación de control que le brinda al sistema una interfaz gráfica sencilla, que únicamente solicita al usuario las coordenadas geográficas del lugar, ya que la hora y fecha son obtenidas por una función desde la configuración de tiempo del PC.

### REFERENCIAS

- [1] Mott, Robert. Diseño de elementos de máquinas. México: Pearson, 2006.
- [2] Ministerio de Minas y Energía y Unidad de Planeación Minero Energética, Atlas de radiación Solar de Colombia, Bogotá, 2005.
- [3] W. Stine y M. Geyer, Power from the Sun: The Sun's Position, 2001.
- [4] Spencer, J. W., Fourier Series Representation of the Sun Position, 1971.
- [5] Duffie & W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes. Madison: Wiley-Interscience, 1980.
- [6] Benford, F y J. Bock. Trans. of the American Illumination Engineering: A time Analysis of Sunshine, 1939.
- [7] Braun, J y J. Mitchell. Solar Energy: Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces, 1983.