

Design and Construction of a Solar Tracking System of a Shaft for Photovoltaic Panels

Anthony D. Atencio, Ing¹, Hernando González, M.Sc,¹ and Yecid A. Muñoz, Dr.¹

¹Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia, aatencio@unab.edu.co, hgonzalez7@unab.edu.co, munoz294@unab.edu.co

Abstract– The article presents the methodology for the design of a solar tracker. The article presents the methodology for the design of a solar tracker. To align the panel with the sun based on the time, date and geographical position in which the photovoltaic panel is located model is used. From the model equations the angle of the panel on its axis is obtained and this value is the reference for a proportional derivative controller. The feedback signal is a potentiometer and linear actuator is used coupled with a crank mechanism the follower shaft.

Keywords— photovoltaic panels, solar tracker, shaft, methodology, geographical position.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.024>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.024>

Diseño y Construcción de un Sistema de Seguimiento Solar de un Eje para Paneles Fotovoltaicos

Anthony D. Atencio, Ing¹, Hernando González, M.Sc.² and Yecid A. Muñoz, Dr.³

^{1,2,3} Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia

¹aatencio@unab.edu.co, ²hgonzalez7@unab.edu.co, ³ymunoz294@unab.edu.co,

Abstract– El artículo presenta la metodología para el diseño de un seguidor solar. Para alinear el panel con el sol se utiliza un modelo basado en la hora, fecha y posición geográfica en la cual se encuentra ubicado el panel fotovoltaico. A partir de las ecuaciones del modelo se obtiene el ángulo de inclinación del panel sobre su eje y este valor es la referencia para un controlador proporcional derivativo. La señal de retroalimentación es un potenciómetro y se utiliza un actuador lineal acoplado con un mecanismo de manivela al eje del seguidor.

I. INTRODUCTION

El aprovechamiento de la radiación solar para generar electricidad a través de sistemas fotovoltaicos ha tenido un desarrollo sin precedentes, a nivel mundial, en los últimos 10 años. Este desarrollo se ha debido a diferentes aspectos entre los que podemos destacar la madurez de esta tecnología y la necesidad de afrontar el calentamiento global, lo cual ha desembocado en tratados para la reducción de emisiones de CO₂, y por consiguiente, en planes de desarrollo e incentivos económicos proporcionados por parte de algunos gobiernos.

Cuando se utilizan paneles solares estáticos para captar la energía solar, no logran una alta eficiencia porque durante el transcurso del día los rayos del Sol no serán perpendiculares al plano de los paneles y por tal motivo se ve reducida su producción, por este motivo se hace uso de seguidores solares.

En 2012, Guardado et al., de la Universidad de Salvador diseñaron un sistema de seguimiento solar con dos ejes, el cual contó con dos fotoresistencias ubicadas en el mismo panel solar para encontrar el ángulo de incidencia de la luz; el desbalance de la señal de estos sensores es enviada a un circuito comparador el cual es activado periódicamente por un PLC para encender un motor eléctrico y un actuador lineal, ambos de 12V, para ubicar el panel solar en sus ángulos correspondientes. La tensión generada en los paneles se dirige a un controlador de carga PHOCOS CX-40 para luego ser almacenada en baterías de 6V [1]. Rustu Eke et. al. realizaron una comparación de rendimiento entre un sistema fotovoltaico fijo inclinado con un seguidor solar de dos ejes, se recolectó datos durante un año entre dos sistemas fotovoltaicos idénticos de 7.9 kW con los mismos módulos e inversores instalados en Mugla University. Al final se calculó que el sistema de seguimiento de dos ejes obtuvo 30.79% más de electricidad que el sistema fotovoltaico fijo inclinado [2].

Eduardo Turrillas et. al. realizaron un estudio comparativo simulado en MATLAB de la eficiencia energética en seguidores solares como trabajo de grado en la Universidad Pública de Navarra. El proyecto comparó sistemas fijos con

sistemas de seguimiento de uno y dos ejes de movimiento. Las simulaciones arrojan que los sistemas de seguimiento de uno y dos ejes obtienen una mejora del 30.41% y 39.35%, respectivamente, en el rendimiento de producción energética en comparación con el sistema fotovoltaico fijo [3]. Canada et. al. diseñaron y construyeron un seguidor solar de dos grados de libertad con un error máximo de 2° en su posicionamiento, este fue de bajo costo y permitía trabajar por una semana sin necesidad de supervisión. El sistema era controlado por un motor paso a paso, incluyendo una interfaz, conectada a un PC, donde se programó un algoritmo en C++ bajo el entorno Windows donde se calculaba la posición del sol y se controlaba el motor y el sistema [4].

Ajay et al. diseñaron un seguidor solar de un eje basado en un microcontrolador y técnicas de control con tiempo, para ser instalado en un arreglo de colectores solares parabólicos. Sensores de viento, radiación y temperatura fueron conectados a un puerto de entradas análogas del microcontrolador que también estaba comunicado con un Real Time Clock (RTC). El microcontrolador utiliza los datos de los sensores y el RTC para calcular la posición del sol y enviar la señal al motor. El algoritmo usado permitía mejorar el rendimiento del sistema ante diferentes circunstancias ambientales como días soleados, días nublados, condiciones de invierno, etc [5]. Abdallah et. al. desarrolló un seguidor solar de un eje controlado por un PLC el cual utilizaba un motor para rotar una estructura con un eje vertical para hacer seguimiento del azimuth, este sistema utilizaba aproximadamente un 3% de la energía producida. El algoritmo divide las horas del día en cuatro intervalos donde la velocidad del motor fue programada en el PLC para cada intervalo. Los gráficos mostraron que se obtuvo un incremento del 40% en las mañanas hasta el mediodía y de un 22% en las tardes [6].

Alberto Cohaila y Edith Paredes implementaron un sistema de seguimiento solar automatizado basado en el microcontrolador PIC 16F84 el cual controlaba un motor de posicionamiento angular; el motor usado se encuentra acoplado a un engranaje de un eje rotacional que permite el desplazamiento del panel. Con este seguidor solar de un eje lograron aproximadamente un aumento del 14.7 % en la concentración de energía solar [7]. En 2010, el ingeniero colombiano Juan Carlos Osorio R. de la Universidad Tecnológica de Pereira realizó el proyecto “Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico”, este diseño se centra en un seguidor de un eje que utiliza un motor paso a paso de 12 voltios controlado por un microcontrolador MC68HC908GP32 según la información suministrada por dos sensores de luminosidad [8].

II. SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

El Sol es una estrella, formada casi en la mayoría por Hidrógeno y Helio, en la que se genera una gran cantidad de energía, debido al proceso de fusión nuclear que se crea en su interior, reacción que tiene lugar gracias a las altas temperaturas y presiones que en ella se alcanzan. El Sol emite una gran cantidad de energía en forma de luz y otros tipos de radiación, incluyendo los rayos-X, esta energía llega al planeta en forma difusa o reflejada por las partículas como las nubes y gases presentes en la atmósfera terrestre, y no se encuentra disponible en iguales cantidades alrededor del globo, encontrando una mayor disponibilidad en aquellas zonas cercanas a la línea del ecuador.

A. Tiempo Solar

Normalmente en la vida cotidiana se usa la hora civil la cual dura 24 horas y que fue creada para que comunidades de una misma zona o país tuviesen la misma hora, pero un día solar costa de un poco más de 24 horas y este tiempo excedente hace que entre la hora civil y la hora solar haya una diferencia de minutos considerables. Para calcular la hora solar es necesario usar la ecuación del tiempo ET , (1), donde d es el ángulo de desviación según el día consecutivo del año N , (2), asumiendo $N = 1$ como el primero de enero y $N = 365$ el treinta uno de diciembre [9].

$$ET \text{ (minutos)} = 9.87 \sin(2d) - 7.53 \cos(d) - 1.5 \sin(d) \quad (1)$$

$$d = \frac{360}{365} (N - 81) \quad (2)$$

A partir de las expresiones anteriores se determina el tiempo solar TS , Equ. (3), donde TC es la hora local.

$$TS(\text{hora}) = TC - ET/60 \quad (3)$$

C. Posición relativa del Sol con un punto en la Tierra

Para determinar la ubicación del sol respecto a un punto en la tierra se hace uso de dos ángulos, el de altura, que es el ángulo del sol con respecto al plano horizontal y el de azimut que se mide en sentido horario a partir del sur hasta la proyección del sol en el plano horizontal (Fig. 1). El valor del ángulo de altitud y azimut es una función de la hora, día del año y latitud del lugar, que puede ser calculado por métodos numéricos [10]. En primer lugar se determina a partir de (4) el ángulo de declinación de la Tierra (Γ) debida al movimiento de traslación, donde N es el día consecutivo del año que se desea conocer.

$$\Gamma = 23.45 \sin \left[(284 + N) \frac{360}{365} \right] \quad (4)$$

El ángulo horario (hs) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, es decir, es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora de referencia, que se obtiene por (5), donde TS es el tiempo solar determinado en (3).

$$hs = (12 - TS) * 15 \quad (5)$$

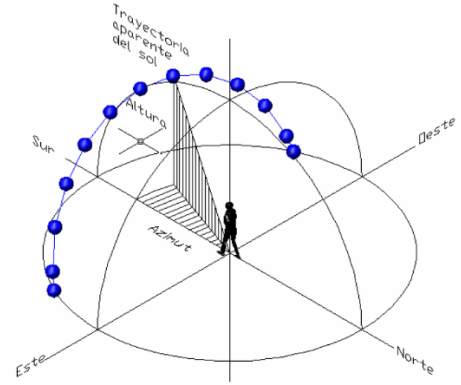


Fig. 1 Ubicación del sol

Con las ecuaciones (4), (5) y la latitud (L) en la cual se va ubicar el panel solar, es posible determinar la altura del sol h .

$$\sin(h) = \cos(L) \cos(\Gamma) \cos(hs) + \sin(L) \sin(\Gamma) \quad (6)$$

El ángulo azimut del sol está dado por (7).

$$\sin(\psi_s) = \frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \quad (7)$$

Es necesario aplicar una función inversa cuando el ángulo azimutal es mayor a 90° (cuando la posición del sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste), bajo el siguiente razonamiento:

$$\cos(hs) > \frac{\tan(d)}{\tan(L)} \Rightarrow \psi_s = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \quad (8)$$

$$\cos(hs) < \frac{\tan(d)}{\tan(L)} \Rightarrow \psi_s = 180 - \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\Gamma) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \quad (9)$$

E. Seguidor Solar de un eje horizontal

El seguidor solar gira sobre un eje horizontal norte-sur y el panel fotovoltaico se ubica paralelo al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a oeste perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene. Este ángulo de inclinación se puede determinar a partir de (10).

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\sin(\psi_s)} \right) \quad (10)$$

III. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

Para el movimiento del panel solar se utiliza un actuador lineal eléctrico junto a un mecanismo manivela-biela-corredera centrado como se puede ver en la Figura 2. El actuador modifica la longitud RCB y el punto C representa el punto de inicio de la carrera del pistón del actuador. El ángulo ϕ representa el

ángulo de inclinación del panel fotovoltaico y la longitud R_{BA} el largo de la manivela.

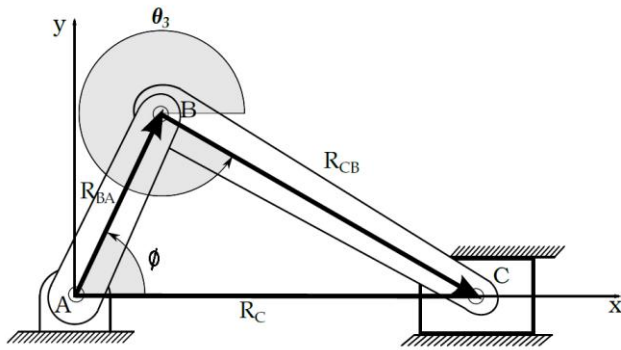


Fig. 2 Mecanismo de giro manivela-biela-corredera

El valor del eslabón R_C que permite manipular el panel entre ángulos de 0° a 180° está dada por (11). Conocida la distancia que debe recorrer el vástago del actuador para obtener el ángulo de control se puede determinar el valor de R_{CB} (12). En la Fig. 3 se observa la curva que representa el ángulo de rotación del panel según el recorrido del actuador. El mecanismo es de retorno rápido, provocando que al acercarse a los 180° , pequeños cambios en el recorrido del actuador cambian rápidamente el ángulo de rotación del panel.

$$R_C = R_{BA} \cos(\phi) + \sqrt{R_{BA}^2 \cos^2(\phi) - R_{BA}^2 + R_{CB}^2} \quad (11)$$

$$R_{CB} = \frac{R_{BA}^2 - 2\phi R_{BA} R_C + R_C^2}{\sqrt{R_{BA}^2 - 2\phi R_{BA} R_C + R_C^2}} \quad (12)$$

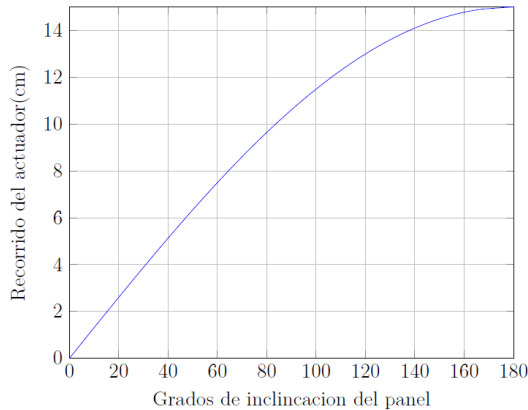


Fig. 3 Ángulo de rotación del panel vs. Recorrido del actuador

La estructura se diseñó para soportar un panel fotovoltaico de referencia YIGLI SOLAR modelo YL250P-29b con dimensiones (1650mm×990m×40mm) y un peso aproximado de 19Kg (Fig. 4). El material utilizado para la estructura fue completamente en aluminio debido a su resistencia química al trabajar en la intemperie y su bajo peso. La base es construida

con tubos en aluminio de perfil rectangular con dimensiones $3'' \times 1,5''$.



Fig. 4 Estructura del seguidor solar

Con el objetivo de realizar un análisis del desplazamiento que puede sufrir la estructura debido a corrientes de aire se realizó un análisis con el FEM de Solidworks. La máxima velocidad del viento registrada por una estación meteorológica en la Universidad Autónoma de Bucaramanga, lugar en el cual se ubicará el seguidor solar es de 20 m/s . A partir de este dato y basándose en el decreto 1400 del año 1984 (Código Colombiano de construcciones sismo-resistentes) [11], se determina la presión del viento sobre una estructura, Equ. (13), donde V_m es la velocidad del viento expresada en Km/h , y H es la altura sobre el suelo de la estructura.

$$P\omega = 0.005 V_m^2 (H/10)^{2/7} \quad (13)$$

Para una altura de 31.5 metros se obtiene una presión del viento de 35.97 Kg/m^2 . Al simular la estructura se observa que el máximo desplazamiento por vientos frontales fue 0.1776 mm y de 1.243 mm ante vientos laterales. El aluminio no superó su límite elástico ($34.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$), ante vientos frontales la tensión fue de $7673,9 \text{ N/m}^2$ y para vientos laterales fue de $25612,57 \text{ N/m}^2$.

IV. SISTEMA ELECTRÓNICO

El procesamiento de los datos y el algoritmo de control del sistema se programó en un Arduino UNO R3. El actuador lineal seleccionado es de referencia LINKAN A/C LA32 y su velocidad se regulaba con una señal PWM; para la etapa de potencia se utilizó la shield para Arduino Pololu dual VNH5019 que opera entre 5.5 y 24 voltios, soporta una corriente de 12 Amp. Para registrar los datos se utiliza la shield Arduino Xd05, la cual cuenta con un reloj de tiempo real que facilita la hora, minutos, segundos, día, mes y año, datos necesarios para calcular el tiempo solar. Para la retroalimentación de la posición

del panel fotovoltaico se utiliza un potenciómetro lineal marca BOURNS de 5K y una vuelta, alimentado a 3.3V.

Debido al ruido presente en la señal de retroalimentación se implementa un filtro digital pasa-bajos Butterworth. Este tipo de filtro tiene la característica de aplanar las señales con muy pocas ondulaciones en la banda pasante. El periodo de muestreo del sistema es de aproximadamente 5,56 ms y la frecuencia de corte es de 3 Hz.

$$G(z) = \frac{0.002554z^2 + 0.005109z + 0.002554}{z^2 - 1.852z + 0.8622} \quad (14)$$

IV. SISTEMA DE CONTROL

Para el control de posición del seguidor solar se utiliza un controlador discreto Proporcional Derivativo (PD), dado que permite entregar una respuesta rápida ante pequeños cambios en la variable del proceso cuando esta cerca a su punto de consigna, evitando la zona muerta del actuador. Al evaluar la respuesta del controlador, Equ. (15), el sistema respondió ante modificaciones de la señal de referencia, observando un error en estado estable de 2° (Fig. 5). Para niveles de referencia cercano a los 150° , la respuesta no es adecuada, esto se debe al comportamiento no lineal del sistema en esta región, como se observó en la Fig. 3.

$$G_c(z) = 2.5 + 0.5(1 - z^{-1}) \quad (15)$$

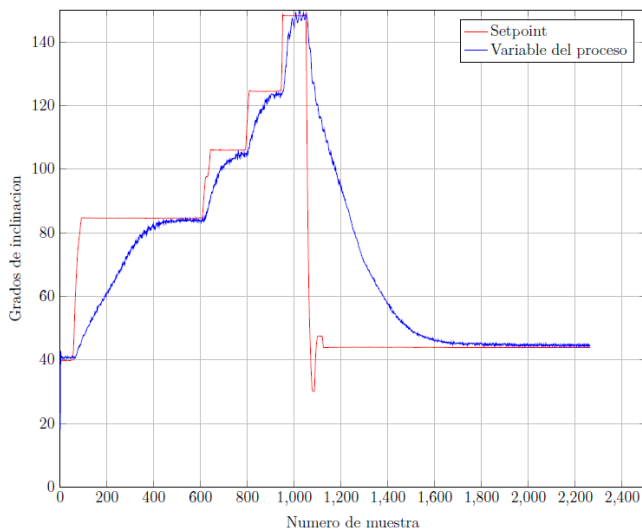


Fig. 5 Respuesta transitoria de la posición del panel solar

La lógica general con la cual opera el sistema cumple con el siguiente protocolo: en primer lugar se determina el ángulo de control a partir de las ecuaciones relacionadas en el numeral dos; el controlador PD ajusta la posición del panel fotovoltaico, para lo cual se destina un tiempo de un minuto, transcurrido este tiempo se envía a cero la señal de control y se espera quince minutos para repetir este proceso. En la noche el panel se ubica en una posición de reposo para evitar ser volcado. La lógica se

estableció con el objetivo de disminuir el consumo de energía del actuador.

V. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para determinar la ubicación del sol permitió el desarrollo de un algoritmo de control fácil de implementar en un sistema de procesamiento digital. El control PD presenta una buena respuesta transitoria, no observándose picos de corriente que pueden disminuir el tiempo de vida del actuador.

REFERENCES

- [1] Guardado Gutiérrez, Domingo y Rivera Chávez, Víctor. *Implementación de seguidor solar en dos ejes para el sistema fotovoltaico de la escuela de ingeniería eléctrica de la UES*. Proyecto de grado, Universidad de El Salvador, 2012.
- [2] Rustu Eke, Ali Senturk. *Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system*. Mugla Sıtkı Kocman University, Clean Energy Research & Development Centre, 2011.
- [3] Eduardo Turrillas Solabre. *Estudio comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares*. Trabajo de Grado. Universidad Pública de Navarra. 2014
- [4] J. Cañada, M.P. Utrillas, J.A.M. Lozano, R. Pedros, J.L.G. Amo, A. Maj. *Design of a sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330 – 1100 nm range*. 2007.
- [5] Ajay K, Nagaraju J. *Micro-controller based sun tracker for line focus concentrating collectors*. Journal of the Solar Energy Society of India. 2003.
- [6] S. Abdallah, O. Badran. *Sun tracking system for productivity enhancement of solar still*. 2008
- [7] Cohaila B. Paredes E. *Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechamiento de la energía solar en sistemas fotovoltaicos*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman, Perú. 2006
- [8] Juan Osorio. *Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico*. Revista Scientia Et Technica, 2010.
- [9] Jan F. Kreider. *Solar energy applications*. Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power, Volumen 4, Tercera Edición. 2006
- [10] José Beltrán Adán. *Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos*. Tesis de maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. 2007
- [11] Decreto número 1400 de 1984. *Código de construcción Sismo-Resistente*. <https://docs.google.com/a/unab.edu.co/file/d/0B-SG0jw0tdq4ZDVlYzQxNzktOWE2Mi00YTtk3LTg5NTgtYzgzYjY4MDNiYjZk/edit?num=50&sort=name&ddrp=1&layout=list&pli=1#>