

**XVIII Simposio Ingeniería Eléctrica 2019**

**Control de posición de Paneles Solares Fotovoltaicos aislados para aplicaciones rurales**

*Position control of isolated photovoltaic solar panels for rural applications*

**José Rafael Abreu García <sup>1</sup>, Asmel Valdivia Marrero<sup>2</sup>**

1-José Rafael Abreu García. Universidad Central Marta Abreu de las Villas Cuba.  
abreu@uclv.edu.cu

2- Asmel Valdivia Marrero. Universidad Central Marta Abreu de las Villas Cuba.  
asmel@uclv.cu

**Resumen:** La energía fotovoltaica tiene ventajas sobre las demás fuentes energéticas dadas por limpieza, protección del medio ambiente, muy bajo costo en mantenimiento y explotación. Desde hace algunos años la inversión inicial, el aspecto más cuestionado, ha ido disminuyendo lo que la hace hoy en día una opción preferencial. En Cuba existe una política gubernamental tendente a incrementar el porcentaje de la utilización de la energía fotovoltaica, tanto sistemas conectados al Sistema Electroenergético Nacional como de manera aislada, esto último como alternativa en lugares aislados. La tendencia general se centra en colocarlos sin movimientos con lo que la eficiencia disminuye en aproximadamente un 10%. El objetivo de la investigación es diseñar un seguidor solar de dos ejes para instalarlos en zonas aisladas aprovechando al máximo las capacidades de generación de dichas células. Se parte de determinar las necesidades, de acuerdo al tipo de aplicación, y de ello el número de paneles necesarios, con sus dimensiones se calculan los parámetros del sistema mecánico. También se diseña el sistema de control que se programa en Arduino unido a las ecuaciones que determinan la posición del sol en una hora, día y longitud y latitud especificada lo que servirá como referencia para el sistema de control. Dado el relativo lento movimiento del sol con respecto a la tierra, el sistema de control se activa cada 4 minutos, actualizando la posición por ambos ejes. Se diseñó el sistema de control y se probó un prototipo experimental con buenos resultados.

**Abstract:** *Photovoltaic energy has advantages over other energy sources given by cleaning, protection of the environment, very low maintenance and exploitation costs. For some years, the initial investment, the most questioned aspect, has been decreasing what makes it a preferential option today. In Cuba there is a government policy aimed at increasing the percentage of the use of photovoltaic energy, both systems connected to the National Electroenergy System and in isolation, the latter as an alternative in isolated places. The general trend focuses on placing them without movement, with which efficiency decreases by approximately 10%. The objective of the research is to design a solar tracker with two axes to install them in isolated areas, taking full advantage of the generation capacities of these cells. It starts from determining the needs, according to the type of application, and from this the number of panels needed, with their dimensions the parameters of the mechanical system are calculated. The control system that is programmed in Arduino is also designed, together with the equations that determine the position of the sun in a specified hour, day and longitude and latitude, which will serve as reference for the control system. Given the relative slow movement of the sun with respect to the earth, the control system is activated every 4 minutes, updating the position by both axes. The control system was designed and an experimental prototype was tested with good results.*

**Palabras Clave:** Energía Fotovoltaica, Control de posición, Arduino

**Keywords:** *Photovoltaic energy, position control, Arduino.*

## 1. Introducción

La viabilidad de la energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones depende en gran medida de la cantidad de energía captada, esta depende de la irradiancia la temperatura y del ángulo de incidencia de los rayos solares, por tanto, es conveniente desarrollar sistemas de seguimiento solar, que sean capaces de seguir perpendicularmente la trayectoria del sol durante el día y a través del año, para así maximizar la eficiencia energética.

Varias ideas han sido propuestas para optimizar el ángulo de inclinación y orientación del colector solar diseñado para distintas latitudes geográficas o posibles periodos de utilización. (Lee et al., 2009), (Yakup and Malik, 2001).

En 1975 uno de los primeros sistemas de seguimiento solar automáticos fue presentado por McFee (McFee, 1975), (Semma and Imamura, 1981) en el cual se desarrolló un algoritmo para calcular la energía total recibida en un punto central, utilizando espejos para enfocar el sol. Mediante el algoritmo podía ser ajustada la dirección de dichos espejos. Algunos años más tarde, Semma and Imamru usaron un simple microprocesador para ajustar adecuadamente la posición de un panel fotovoltaico apuntando el sol todo el tiempo, (Badescu, 2008). Luego en 1986, Akhedyarov (Akhmedyarov, 1986) mostró el primer incremento de potencia en Kazakhstan de 350W a 500W utilizando un sistema de seguidor solar con control en lazo cerrado. Kang y Martínez propusieron un sistema de seguimiento basado en la colocación de sensores de intensidad luminosa sobre el panel presentando dificultades en caso de nubosidad (Kang Martínez, 2009). En el año 2010 Sali Naven, propuso un sistema de seguimiento solar utilizando las facilidades del GPS (Sali et all, 2010), Marta Salas (Salas, 2009) Propone un seguidor solar que utiliza un acelerómetro para determinar la inclinación, lo que dificulta el diseño. En el 2015 Andrea Salazar (Salazar, 2015) propone un sistema de control basado en la utilización de sensores luminosos y procesamiento de sus emisiones mediante un Arduino que es ineficaz en caso de días nublados.

## **2. Metodología**

Para el desarrollo de la investigación se partió de la necesidad de utilizar paneles aislados en nuestro país y sus posibles aplicaciones para estas zonas. El análisis de diferentes variantes de sistemas de seguimiento fue objeto de estudio, concluyéndose en la necesidad de mantener el movimiento a pesar de nubosidades. A partir de los requerimientos de las aplicaciones posibles se diseñó la estructura para soportar los paneles y el sistema de control de posición basado en la determinación de las coordenadas astronómicas implementándose en un prototipo a escala.

## **3. Resultados y discusión**

La investigación sobre las aplicaciones de los paneles aislados en el país arrojó como resultado la utilización en la energización de casas y en la agricultura como sistemas de riego y en el suministro de agua a una masa ganadera. Las aplicaciones se diferencian en la necesidad de una batería en el caso de los domicilios que se sustituye por un tanque en su utilización para las otras aplicaciones.

En dependencia de la zona en que se ubiquen los paneles existirá un horario en el cual se puede obtener energía, generalmente de 8 AM a 5 PM con intensidad variable, donde la máxima disponibilidad se dará alrededor de las 12 M.

Según datos suministrados por el MINAGRI la necesidad de agua en el mes de máxima demanda para vaquerías es de 120 litros por cada animal. La capacidad de los tanques disponible es de alrededor de 20,000 litros. Para esa aplicación se seleccionó la bomba PS 1200 HR-14 (Lorentz, 2014), que puede bobear 14 mil litros de agua, funcionando a plena capacidad durante unas 9h al día, transportando está a una altura de 20 m, lo cual es suficiente para la profundidad estándar de los pozos existentes.



Figura 1. Diagrama de funcionamiento para el bombeo fotovoltaico Tomada del catálogo de bombas (Lorenz 2015)

El tamaño de un sistema FV está dado por el Watt Pico (Wp). Esta es la salida máxima de un panel FV bajo condiciones estándar, que son: temperatura ambiente de 25°C y 1000 Watt/m<sup>2</sup> de irradiación. Uno de los paneles ensamblados en Cuba suministra 180Wp por lo que para cubrir la demanda en el caso del ganado se necesita instalar 2 módulos en paralelo, suministrando una potencia de 360Wp. Lo que permite cubrir la demanda de energía planificada, aunque esta tiende a sufrir fluctuaciones durante el año, tanto por efecto del clima como por variaciones en la demanda que puede ser cubierta por la reserva existente en el tanque. El diseño se realizó utilizando dos paneles fotovoltaicos de 180Wp.

## II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”



Para esa aplicación se seleccionó la bomba PS 1200 HR-14 (Lorenz, 2014), que puede bombear 14 mil litros de agua, funcionando a plena capacidad durante unas 9h al día, está formado por la bomba sumergible de la capacidad seleccionada y un controlador que trae implementado el algoritmo MPPT y otras prestaciones como detección de marcha en seco y mando a distancia.

### *Hardware de control*

En la actualidad se comercializa microcontroladores y plataformas microcontroladoras preensambladas, como son Parallax Basic Stamp, Phidgets entre otros, con grandes capacidades y ofertas de funcionalidades similares. Arduino es una exitosa plataforma microcontroladoras, con la característica de ser de código abierto basada en hardware y software flexibles y fácil de usar.

Todos estos pueden ser programados y diseñados de forma tal que puedan recibir información del medio externo, procesar esta información y reaccionar de acorde a ésta manipulando disímiles actuadores para controlar procesos y variables de interés.

### *Sistema de control*

El sistema de control se basa en la obtención de las coordenadas astronómicas calculadas, con una plataforma Arduino con reloj, a partir de las especificaciones de longitud y latitud del lugar de ubicación de los paneles, la fecha y hora. Los que servirán de valor deseado para el sistema de control en lazo cerrado. Debido al lento cambio de la posición del sol relativo al lugar se ideó un sistema que actualizara la ubicación de los paneles cada 4 minutos durante este periodo la variación de la posición debe ser de alrededor de  $1^{\circ}$ .

### *Estructura mecánica*

Para el diseño de la estructura mecánica debemos recordar que se trata de un sistema que debe poseer dos grados de libertad perpendiculares, para seguir tanto el ángulo de elevación como el azimutal, para ello se realiza el análisis de las fuerzas que intervienen en cada uno de los ejes considerando la posición más crítica que coincide con la vertical como se muestra en la figura 2.

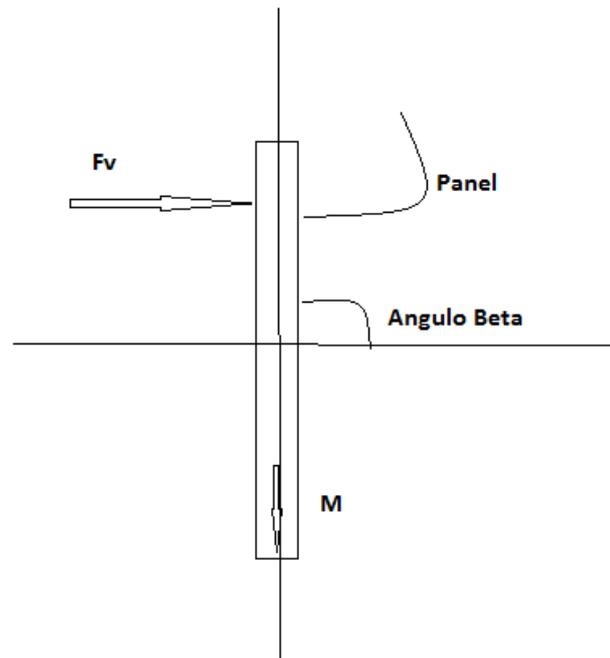


Figura 2. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el panel solar en su posición más crítica. Elaboración propia.

Para el diseño se utiliza como valor de la masa del panel 15.8 kg.

Para que el sistema esté en equilibrio en la posición azimutal debe cumplirse las siguientes ecuaciones

$$\sum Fy = 0 \quad No = Mg$$

$$\sum Fx = 0 \quad Fv = Fav$$

Donde M es la masa del panel y g la gravedad =9.81 m/s<sup>2</sup>

Con el valor de 15.8 kg de masa del panel

$$No = 155 \text{ N}$$

Conociendo la distancia entre el mecanismo situado en el eje y el modulo solar podemos determinar el momento

La fuerza ejercida por el viento Fv se determina mediante la expresión

$$Fv = A * P$$

Dónde: A es la proyección del área frente al viento P es la presión que ejerce el viento.

Para la determinación de la presión se emplea la formula genérica utilizada en la aerodinámica y que expresa:  $P = Cd * Ro * V^2 / 2$

Dónde: Ro densidad del aire seco= 1.223 Kg/m<sup>3</sup> V velocidad del viento Cd coeficiente aerodinámico de resistencia al avance, que para una superficie plana es 1.17

Suponiendo una velocidad de aires de 30 km/h

$$V = 8.33 \text{ m/s}$$

$$P = 49.6 \text{ N/m}^2$$

$$\tau a = 91.45 \times 1.51 / 2 = 69.05 \text{ Nm} \quad (2)$$

Para el ángulo de declinación el caso extremo ocurrirá cuando  $\text{Beta}=0$

$$Fy = 155 \text{ Nm} \quad (3)$$

El momento se obtiene con la mitad del ancho

$$\tau d = 94.5 \text{ Nm} \quad (4)$$

Debido a las características de trabajo el motor más idóneo es el motor paso a paso con un giro de 1.8 grados por paso y posibilidades de desarrollar un momento mayor de 7.67 Nm.

#### *Plataforma de prototipos electrónica Arduino*

El bajo costo y las facilidades de programación hacen que la placa Arduino sea ideal para este tipo de aplicación. En la figura 3 se muestra la placa utilizada.



Figura 3. Placa de la plataforma Arduino UNO Tomada de la hoja de datos de la plataforma

Arduino puede tomar información a través de sus pines de entrada, a los que se le puede conectar una amplia gama de sensores y transductores. Del mismo modo, puede actuar sobre dicho entorno mediante sus pines de salida. Con ellos es posible controlar luces, motores, relés, altavoces y todo tipo de actuadores.

El microcontrolador de la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino. Es un lenguaje de alto nivel con unas sentencias y sintaxis muy similares a las de lenguaje C. También posee un entorno de desarrollo basado en procesamiento, que permite la edición de un programa con el lenguaje Arduino, su verificación, compilación y la grabación sobre el controlador.

Dicho entorno es código abierto y está disponible para plataformas Windows, Mac, etc. Una vez grabado el programa en la memoria del controlador, éste se ejecuta sin necesidad de estar conectado a un ordenador. Tenemos así un proyecto hardware/software totalmente autónomo.

El hardware de Arduino está basado en el procesador ATMEL, un chip sencillo y de bajo costo que permite el desarrollo de múltiples diseños. Según ha ido avanzando el tiempo, el procesador se ha ido actualizando hasta llegar al modelo Atmega1280 con mejores prestaciones, como por ejemplo más memoria flash.

El Arduino UNO dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. La intensidad máxima de entrada también es de 40mA.

#### *Software de programación*

El entorno de desarrollo (IDE) de Arduino mostrado, lo constituye un editor de texto, donde se plasmará el código; una consola de texto, un área de mensajes y la barra de herramientas con sus menús.

#### *Estructura de un programa*

Arduino se programa en C++, admitiendo la gran mayoría de librerías usadas en C++ y todas sus estructuras básicas. Todo programa tiene siempre la misma estructura:

Setup(). La función setup() se establece en cuanto se inicia el sketch. Se usa para iniciar variables declaradas anteriormente, asignar pines, cargar librerías, etc. Esta función solo se ejecuta una vez desde que se conecta la placa al ordenador o se reinicia.

Loop(). Una vez inicializados y preparados todos los valores y funciones necesarias, esta función se ejecuta sucesivamente hasta la desconexión de la placa.

Arduino incorpora sus propios temporizadores, uno de ellos manejado por la función millis(). Los contadores cuando se inician empiezan desde 0, una vez conectada la alimentación, Este contador se encarga de indicar cuánto tiempo lleva activado el Arduino y una vez se pierde la alimentación, este valor desaparece. Por lo que para proyectos en donde se necesita usar el tiempo como variable se necesita usar un reloj RTC externo que posea una batería para almacenar los datos (Arduino, 2014).

#### *Montaje mecánico de los paneles*

La estructura ideada se muestra en la figura 4, se basa en un soporte tubular (2) anclado a una base de concreto (1) mediante tornillos empotrados en dicha base. En el extremo

superior del pedestal (2), van ubicado los mecanismos de giro, tanto horizontal como vertical.

Primero se encuentra el mecanismo de accionamiento horizontal (3), conformado por un motor paso a paso con un tornillo sinfín acoplado a la salida, la parte móvil, consta de una rueda dentada que le permite girar un ángulo de  $240^\circ$  al módulo fotovoltaico, la rueda está unida a la articulación horizontal (7), la cual se acopla mediante un rodamiento al pedestal

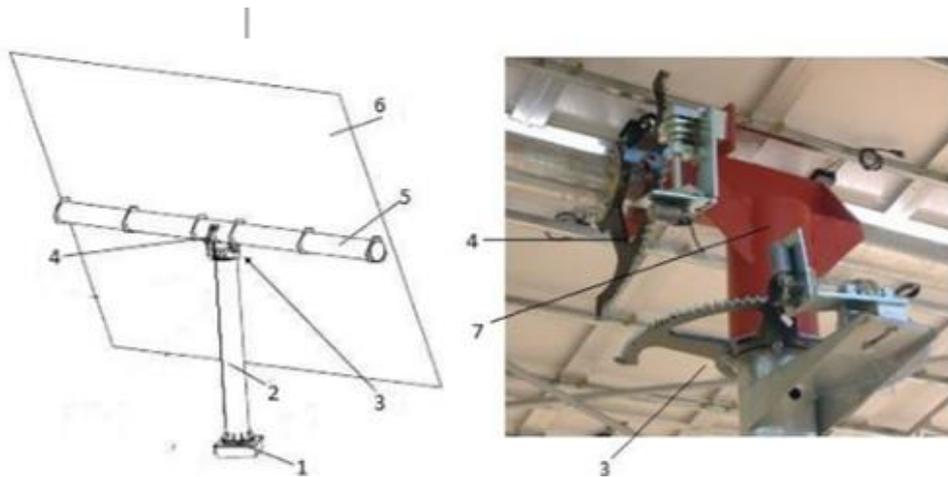


Figura 4. Estructura de sujeción de mecanismos de seguimiento del módulo fotovoltaico.

El mecanismo de seguimiento vertical, o de la altura (4), conformado por un motor paso a paso se acopla mediante un tornillo sinfín a la salida. Este conjunto está fijado a la articulación de movimiento horizontal (7) y se acopla a una rueda dentada fija a la estructura del panel (6) mediante el eje de giro vertical (5). Dicho eje se sostiene mediante dos pedestales que le brindan movilidad con rozamiento despreciable.

#### *Validación del algoritmo y software de control aplicado*

Para validar el algoritmo de control desarrollado se construyó una maqueta a escala del mecanismo de accionamiento la cual se muestra en la figura 5. Cuenta con las mismas relaciones de engranaje que el mecanismo diseñado para mover el módulo fotovoltaico, por lo cual se asume que deben comportarse de forma similar. De esta forma, si los resultados obtenidos en las pruebas con la maqueta son positivos, se puede afirmar que tanto el algoritmo planteado como su implementación en la plataforma Arduino están listos para controlar los módulos fotovoltaicos reales.

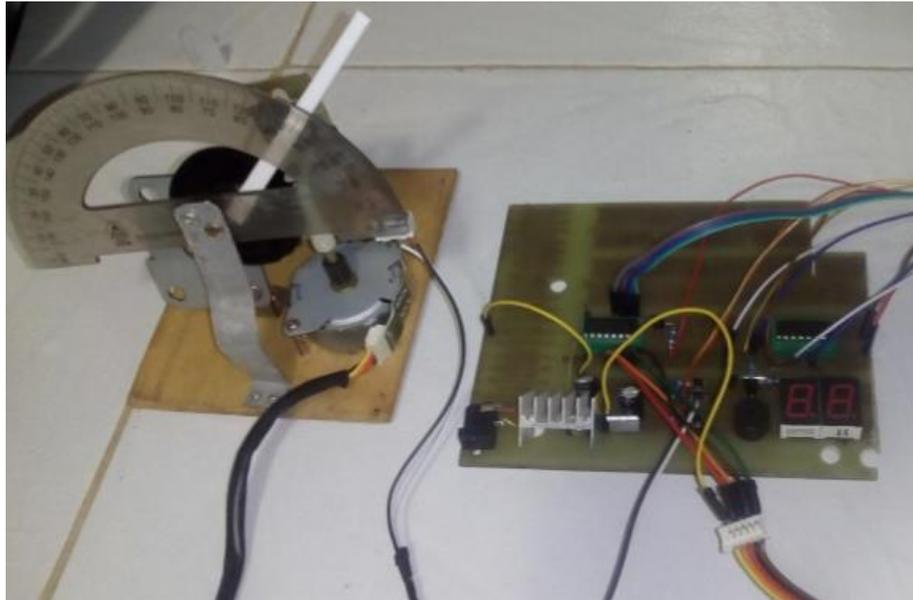


Figura 5. Maqueta construida con el sistema de control real.

Inicialmente se implementó una estrategia de seguimiento basada en el avance de un grado cada cuatro minutos, a partir del concepto de que el sol avanza  $15^\circ/h$  con respecto a la tierra. Pero como se aprecia en la figura 6 no se logra un seguimiento eficiente, ya que el avance acimutal del sol durante el día no es una función lineal.

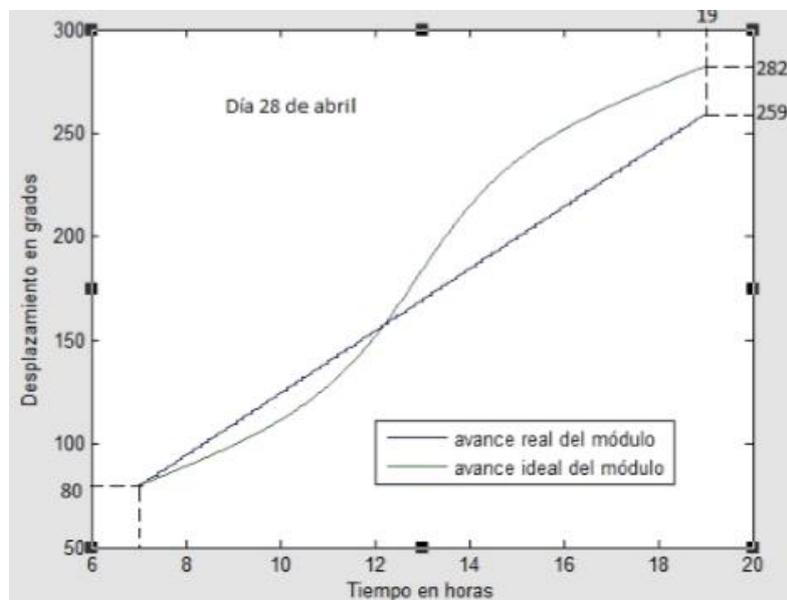


Figura 6. Resultado del seguimiento con avance de 1 grado cada 4 minutos.

La estrategia basada en el cálculo de la posición del sol cada cuatro minutos, muestra un seguimiento solar preciso como se observa en la figura 7. En esta aparece la comparación entre el movimiento ideal que debería seguir el módulo solar y el real que realiza tras

calcular y reajustar el ángulo azimutal cada cuatro minutos en los días correspondientes al 21 de marzo o septiembre, o sea durante los equinoccios.

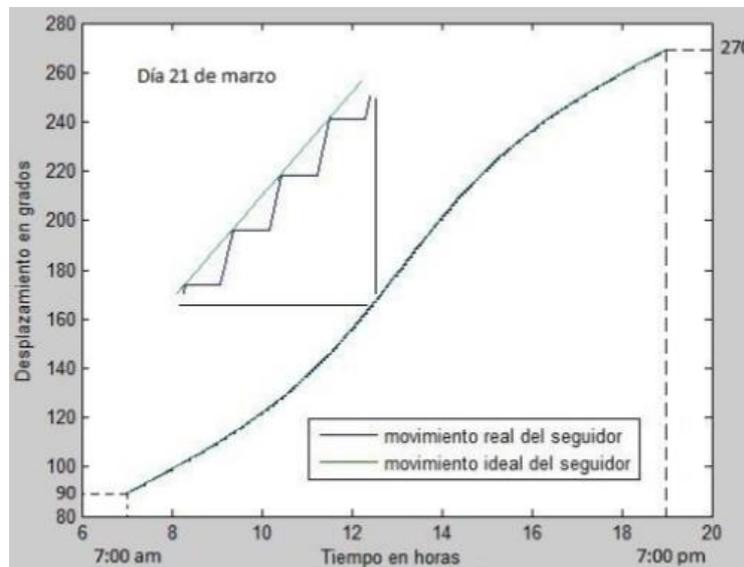


Figura 7. Comparación entre comportamiento ideal y real del seguimiento acimutal.

En la figura 8 se muestra el avance del seguidor con respecto al ángulo de elevación. Este tiene implementado el algoritmo de cálculo y reajuste de la posición solar. También lo hace con una buena precisión ya que al tener el motor un avance de  $1.8^\circ$  por paso y una reducción el mecanismo de 9:1 le permite tener una resolución de  $0.2^\circ$ , suficiente para que el seguimiento tenga un error imperceptible.

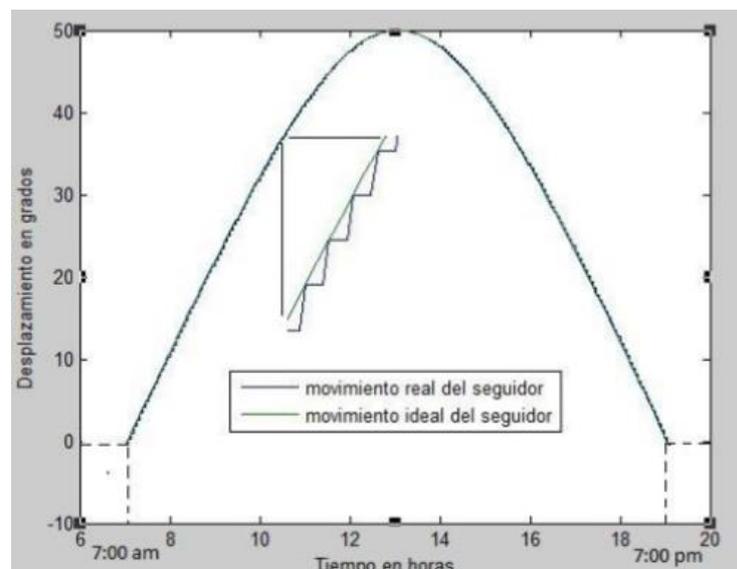


Figura 8. Comparación entre comportamiento ideal y real del seguimiento de la altura.

*Análisis económico y medioambiental*

Además de los beneficios debido a la disminución de la contaminación ambiental y de las dificultades en suministrar la energía necesaria por el aislamiento de los sitios donde se debe suministrar mediante el SEN, se producen ahorros con la inclusión del sistema de posicionamiento. En el caso del bombeo de agua, para cumplir con la demanda diaria de agua se necesita un módulo de 420Wp lo cual representa la instalación, sin posicionamiento, de tres módulos de 180 Wp de los producidos en Cuba. Cada módulo cuesta 300CUC, usando seguimiento solar solo se necesita una potencia instalada de 350Wp, lo cual puede ser generado con dos módulos de 180Wp. Esto genera un ahorro de 300 CUC, a los cuales hay que aumentar 20CUC de hardware de control y el circuito de acondicionamiento, 20CUC por los dos motores paso y 100 CUC por el costo de la estructura, dejando un ahorro final de 440 CUC. Además, el sistema de seguimiento diseñado en este trabajo es muy fácil de instalar y de mantener, pues tiene un diseño simple y fuerte

#### 4. Conclusiones

El control de la posición por dos ejes utilizando una plataforma Arduino se implementó con pleno éxito a partir de introducir los datos de latitud y longitud del lugar, día del año y hora.

El control de la posición usando la estrategia desarrollada de cálculo de la posición en cada instante, arrojó excelentes resultados. Haciendo que el mecanismo siga al sol con un mínimo error.

Este algoritmo pudo ser implementado sin dificultad en el controlador Arduino y por las pruebas realizadas en la maqueta se espera que interactúe sin problema con el hardware seleccionado.

Los sistemas fotovoltaicos fueron seleccionados teniendo en cuenta las demandas energéticas actuales y previsiones de las futuras demandas. Por lo cual estos deben funcionar óptimamente durante su período de vida útil.

Con el fin de incrementar la eficiencia del captador solar es necesario determinar cuál de los algoritmos utilizados para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es el de mayor eficiencia.

#### 5. Referencias bibliográficas

AKHMEDYAROV, K. 1986. Economic efficiency of the FV-500 solar photoelectric station with automatic tracking of the sun. *APPL. SOLAR ENERGY.*, 22, 44-47.

ARDUINO 2015. Manual de Arduino, programación y conceptos. *Arduino UNO*. Zonamaker

BADESCU, V. 2008. Theoretical derivation of heliostat tracking errors distribution. *solar energy*, 82, 1192-1197.

LEE, C.-Y., CHOU, P.-C., CHIANG, C.-M. & LIN, C.-F. 2009. Sun tracking systems: a review. *Sensors*, 9, 3875-3890.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



LORENTZ 2014. Bomba sumergible sistema 4” con alimentación solar, con unidad de bomba de hélice excéntrica (HR) o centrífuga (C). *In: LORENTZ (ed.) PS 1200 HR/C.* Alemania.

MCFEE, R. 1975. Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system. *Applied optics*, 14, 1493-1502.

SALAZAR, A. 2015. Diseño de un Sistema Fotovoltaico con control de posicionamiento *Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil*

YAKUP, M. A. B. H. M. & MALIK, A. 2001. Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. *Renewable Energy*, 24, 223-234.