

# EXPERIMENTACIÓN DEL HARDWARE DE CONTROL PARA UN SEGUIDOR SOLAR

## EXPERIMENTATION WITH THE CONTROL HARDWARE FOR A SOLAR TRACKER

**Recibido:** 05 de abril del 2011

**Aprobado:** 20 de mayo del 2011

JOSÉ-ULISES CASTELLANOS\*

Estudiantes que participaron en el proceso de recolección de datos:

MARIO HERNANDO SÁNCHEZ\*\*

EVERTH OSWALDO CALDERÓN\*\*\*

DANIEL HERNANDO GÓMEZ\*\*\*\*

### Resumen

En la actualidad, el uso racional de la energía es un aspecto clave para el desarrollo sostenible; esta preocupación ha comenzado a impulsar la investigación de energías limpias que conserven el medio ambiente. Desde esta perspectiva, en la Universidad Cooperativa de Colombia se desarrollaron equipos de medición y adquisición de datos a partir de la tesis de pregrado "Factibilidad para el diseño de un sistema de captación, almacenamiento, distribución y uso de energía fotovoltaica en Bogotá", realizada en el 2010. El artículo, derivado de dicha investigación, explica el diseño y experimentación de diferentes controladores análogos con el fin de determinar cuál es el más eficiente para el seguimiento de la luz del sol en Bogotá. Los controladores análogos implementados son del tipo *On-Off*, proporcional y PID, los cuales están enmarcados dentro del control clásico que ha sido objeto de estudio por largos años, generando una teoría muy precisa para facilitar su implementación. Los autores explican un producto de investigación relacionado con el controlador más eficiente por ensayo y error para un sistema de seguimiento solar.

**Palabras clave:** controlador análogo tipo on-off, proporcional, seguidor solar, sistemas de control.

### Abstract

At present, the rational use of energy is a key aspect of sustainable development; this concern has begun driving clean energy research to conserve the environment. With this in mind, measuring and data acquisition equipment has been developed at the Universidad Cooperativa de Colombia based on the graduation project: "Feasibility for the design of a system for the collection, storage, distribution, and usage of photovoltaic energy in Bogota" made in 2010. This article, which stems from said investigation, explains the design and testing of different analog controllers in order to determine the most efficient way to follow the sunlight in Bogota. The Analog controllers that were implemented are *On-Off*, proportional and PID types, which are within the classic control methods that have been studied for many years; thus there exist a very precise theory that facilitates their implementation. The authors explain a research product for a solar tracking system that uses the controller found by trial and error to be the most efficient.

**Keywords:** on-off type analog controller, proportional, solar tracker, control systems.

• Cómo citar este artículo: José-Ulises Castellanos. "Experimentación del hardware de control para un seguidor solar". *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 7, núms. 12-13, 2011, pp 53-59.

\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Los Libertadores. MSc en Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. MSc en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Nacional de Colombia. Docente de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: jose.castellanos@campusucc.edu.co

\*\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: maoh0510@hotmail.com

\*\*\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: evercalderon@gmail.com

\*\*\*\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: prolab2008@gmail.com

## Introducción

El aprovechamiento racional de energía es un aspecto de estudio en muchos países. Esto se presenta debido a que la energía proveniente del petróleo en algún momento se va a terminar. Aunque existen muchas fuentes alternativas de energía, la energía solar, en especial, resulta ser de gran importancia, ya que se considera como una fuente limpia, es decir, que no produce contaminación en su proceso de aprovechamiento[1].

El aprovechamiento de la energía solar varía según su forma de obtención y utilización; una de esas formas de obtención de energía son los paneles fotovoltaicos, en los que la obtención de la corriente eléctrica está dada por la intervención de un fenómeno denominado efecto fotoeléctrico. Los materiales utilizados como componentes de las celdas solares (dispositivos en los que incide la energía solar) están fabricados a partir de otros materiales con propiedades específicas, denominados semiconductores, como láminas delgadas de silicio y boro. Los sistemas de conexión a red de las celdas no requieren ningún mecanismo de acumulación de energía y la corriente, posteriormente, se la puede utilizar como continua o alterna. De esta manera, dicha energía puede alimentar muchos electrodomésticos como radio, teléfono, ventilador y, en general, satisfacer el servicio de electricidad de consumo doméstico. Este proceso no ocasiona contaminación al medio ambiente.

Para el adecuado aprovechamiento de la energía solar, es necesario contar con equipos apropiados que permitan lograr este fin. Uno de estos equipos consiste en un seguidor solar, con el cual se busca orientar el elemento que capta la energía solar siempre en la dirección de la máxima radiación. En los sistemas de aprovechamiento de energía solar, es de gran importancia tener la capacidad de realizar un seguimiento adecuado del sol con la finalidad de poder adquirir la máxima cantidad de radiación de este en todo momento del día.

Este sistema que sigue el sol está compuesto, principalmente, de cuatro subsistemas fundamentales: parte mecánica, sistema de control, captador de la radiación y adquisición de datos. En esta primera parte de la investigación, nos enfocaremos en el control análogo y su adecuada escogencia.

Un control análogo es un proceso en el cual se modifica o se manipulan variables que pueden estar internas o externas al proceso en una planta o sistema, de tal manera que su salida siga un *set point* determinado o ajustado [2].

Sobre las técnicas empleadas comúnmente para los sistemas de seguimiento solar, se tiene: control *On-Off*,

control proporcional, integral, derivativo (PID) [2], control difuso y redes neuronales [3].

En este trabajo, se muestra el diseño y experimentación de diferentes controladores análogos para el seguidor solar. Los controladores análogos implementados son del tipo *On-Off*, proporcional y PID, los cuales están enmarcados dentro del control clásico que ha sido de estudio por largos años, dando como resultado una teoría muy precisa para facilitar su implementación. Se partirá del supuesto según el cual la trayectoria solar será la misma para todo el  $\Delta t$  (tiempo), por tal motivo lo tomaremos lineal e invariante en el tiempo.

## Metodología

Para determinar cuál es el controlador más eficiente se procede a ensayar con los ya existentes y observar cuál es el más adecuado para la ciudad de Bogotá; para lograr este objetivo se requiere determinar el modelo del sistema.

## Modelo del sistema

El montaje realizado del seguidor solar se puede apreciar en la figura 1.

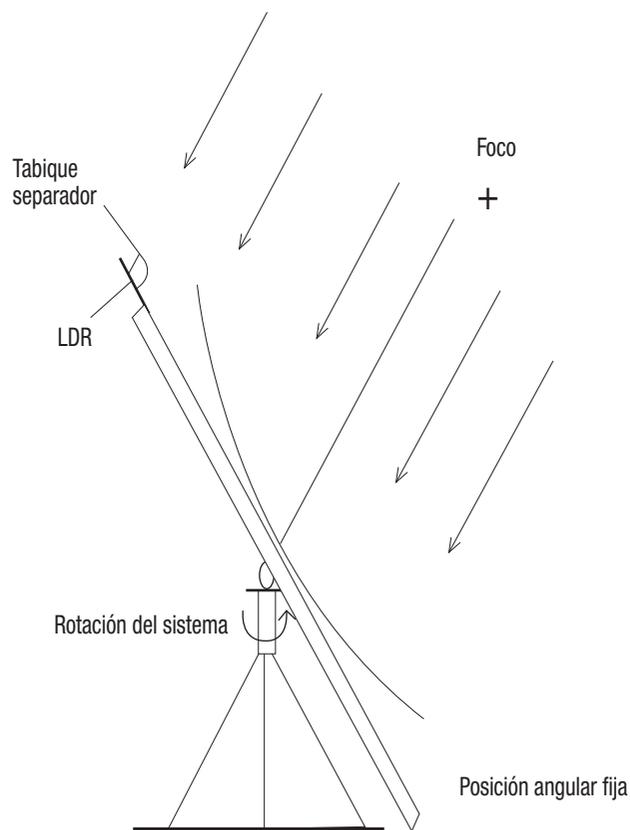


Figura 1. Seguidor solar

Fuente: los autores

Un modelo lineal para este sistema resulta al considerar un motor corriente directa (D.C.), acoplado con una inercia  $J$  en la presencia de fricción  $B$ . Para realizar el modelo del sistema, se considera inicialmente la parte eléctrica y, posteriormente, la parte mecánica.

**Parte eléctrica**

El motor es una parte fundamental del modelo dinámico, ya que este proporciona el torque necesario para que reflector gire. La figura 2 muestra el diagrama eléctrico del motor.

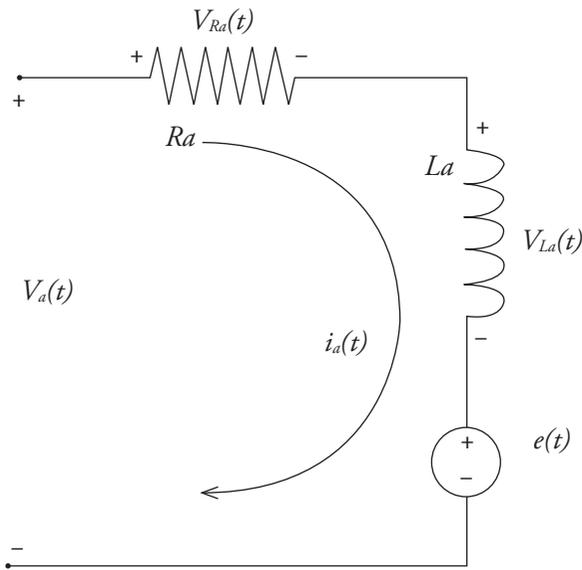


Figura 2. Esquema eléctrico del motor  
Fuente: Nise [4]

Inicialmente, se tiene que el torque del motor es proporcional a la corriente de armadura, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$T_M = K_t i_a(t)$$

Ecuación 1. Torque de Motor

La fuerza contra-electromotriz es proporcional a la velocidad angular del motor, según la siguiente ecuación:

$$e(t) = K_e \omega(t)$$

Ecuación 2. Fuerza electromotriz

Por otro lado, al realizar el respectivo balance de energía del modelo eléctrico, se tiene:

$$V_a(t) = V_{Ra}(t) + V_{La}(t) + e(t)$$

$$V_a(t) - R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t)$$

$$V_a(t) - e(t) - R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}$$

Ecuación 3. Balance de energía eléctrica[2]

**Parte mecánica**

Esta parte se analiza observando los torques presentes en el rotor del motor. La figura 3 muestra los torques que actúan en el motor. La relación entre el torque generado y el torque de carga se obtiene realizando una sumatoria de torques, tal como se muestra a continuación:

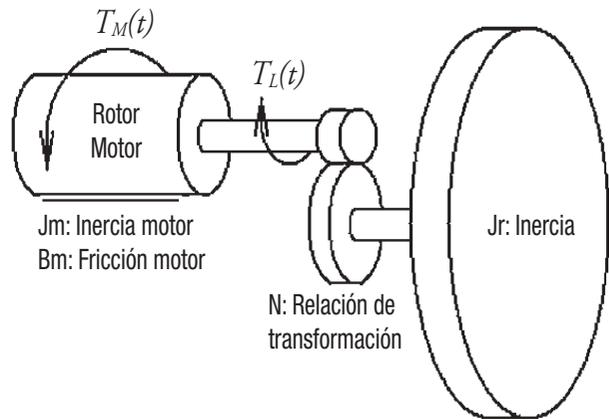


Figura 3. Torques presentes en el motor  
Fuente: Ogata [2]

$$\sum T = J \alpha (t)$$

$$T_M(t) - T_L(t) - B_m \omega(t) = J \alpha(t)$$

$$T_M(t) - T_L(t) = B_m \omega(t) + J \alpha(t)$$

Ecuación 4. Balance de torques

Si se quiere observar la presentación de esta ecuación como función de transferencia, se aplica transformada de Laplace, para sistemas dinámicos de primer orden, obteniendo el siguiente resultado:

$$T_M(s) - T_L(s) - B_m \Omega(s) = J s \Omega(s)$$

$$\Omega(s) = \frac{1}{J_s + B_m} (T_M(s) - T_L(s))$$

Ecuación 5. Balance de torques en Laplace

### Modelo simplificado

Como es de apreciar, el anterior modelo requiere conocer los parámetros de inercia y rozamiento asociados al modelo, lo cual puede ser difícil de calcular, motivo por el cual para el sistema se considera un modelo de primer orden con un integrador, tal como se aprecia en la figura 4:

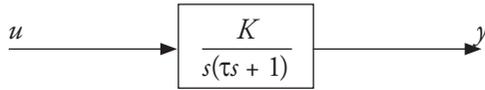


Figura 4. Modelo simplificado del sistema

Fuente: Nise [4]

## Resultados

### Parámetros del modelo

Tal como se mencionó anteriormente, el modelo considerado del sistema es:

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$$

Ecuación 6. Función de transferencia (Integrador)

Para este tipo de sistema el parámetro  $K$  se puede obtener como la relación de la entrada y la salida en estado estable, para el caso es:

$$K = \frac{\Delta v}{\Delta \omega}$$

Ecuación 7. Fuerza electromotriz

Donde  $\omega$  es la velocidad angular. Con un voltaje de 12V, los tiempos gastados por el sistema para recorrer un ángulo de  $\pi / 2$  se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Velocidad angular del sistema

Tiempo (seg)	Velocidad angular
26,43	0,059432
26,37	0,059567
24,3	0,064641
27,85	0,056402

Fuente: los autores

La velocidad promedio del sistema fue de 0,06 rad/seg, para una alimentación de 12V, por lo tanto el valor del parámetro  $K$  es de 0,005 rad/seg.

Por otro lado, el parámetro  $\tau$  se puede determinar como la cuarta parte del tiempo de establecimiento del sistema. Los tiempos de establecimiento del sistema para diferentes mediciones se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tiempos de establecimiento del sistema

Medición	Tiempo (seg)
1	1,73
2	1,49
3	1,38
4	1,54
5	1,67
6	1,43
7	1,49
8	1,41
9	1,4
10	1,76

Fuente: los autores

En promedio, el tiempo de establecimiento del sistema es de 1,53 segundos, por lo tanto, el parámetro  $\tau$  es de 0,38 segundos. Finalmente, el modelo de la planta es:

$$G(s) = \frac{0,005}{s(0,38s + 1)}$$

Ecuación 8. Función de transferencia Integrador (autores)

### Circuito de conmutación

Una característica importante en el sistema de seguimiento es la posibilidad de tener tanto una acción manual, como automática. Esta característica le permite al operario realizar ajustes manuales en el caso de ser necesario. El circuito empleado para este propósito se puede apreciar en la figura 5.

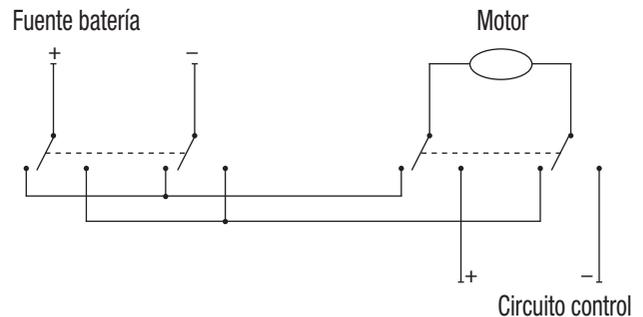


Figura 5. Sistema de conmutación manual-automático del sistema

Fuente: los autores

### Control On-Off

La estrategia de control implementada se encuentra basada en la diferencia de voltaje que se tiene sobre un arreglo de dos sensores, tal como se puede apreciar en la figura 6.

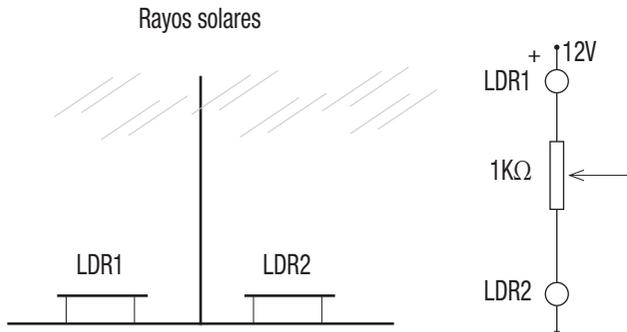


Figura 6. Arreglo de sensores empleado

Fuente: los autores

El circuito empleado para el control *On-Off* se puede apreciar en la figura 7.

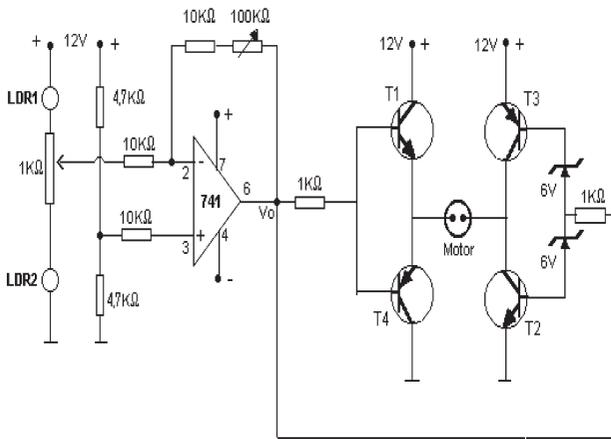


Figura 7. Circuito para el control On-Off

Fuente: los autores

En este caso, el circuito genera una ventana de umbral, permitiendo que el sistema se establezca en un rango correspondiente a la diferencia de iluminación presente en los sensores.

### Control proporcional

Aprovechando que la diferencia de iluminación se puede establecer directamente del arreglo de los dos sensores, entonces la modificación que se puede realizar al circuito del controlador *On-Off* consiste en adicionar un circuito seguidor que permita tener un voltaje de referencia cero con la finalidad de lograr una acción proporcional sobre el motor D.C., sin necesidad de emplear fuente dual.

El circuito implementado para el control proporcional se puede apreciar en la figura 8.

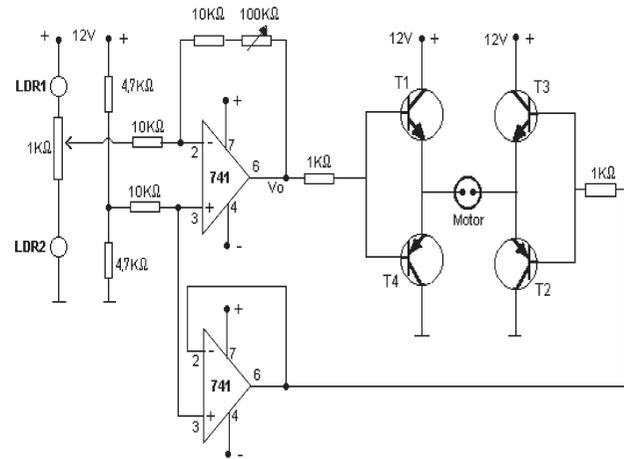


Figura 8. Circuito para el control proporcional

Fuente: los autores

### Control proporcional modificado

Con la finalidad de poder incorporar otras estrategias de control, al circuito del controlador proporcional se le agrega un conector, tal como se aprecia en la figura 9.

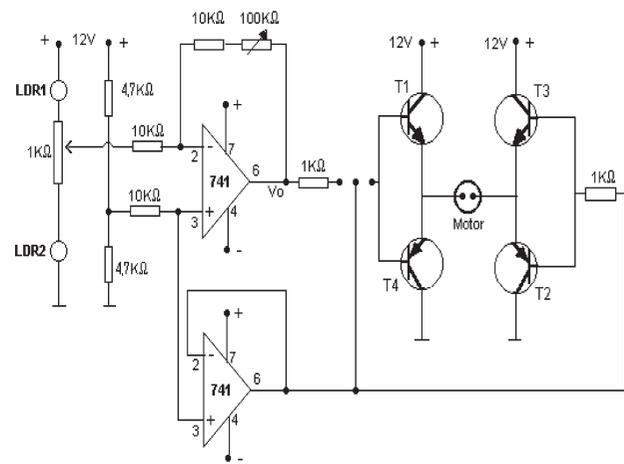


Figura 9. Circuito para el control proporcional modificado

Fuente: los autores

Con la anterior modificación, fue posible incorporar un controlador del tipo PID para el sistema.

### Controlador PID

Como se relacionó anteriormente, debido a la modificación realizada al controlador proporcional, el controlador PID se puede implementar de forma separada tal como se aprecia en la siguiente figura.

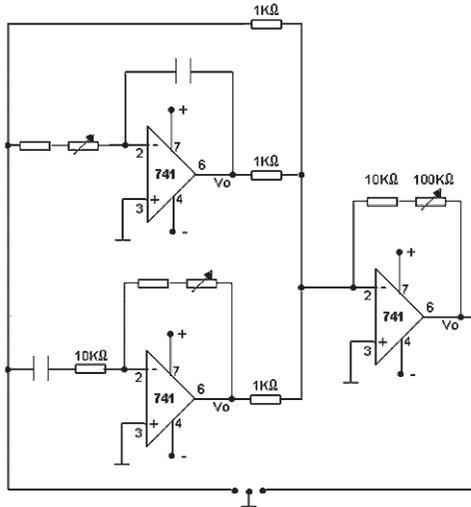


Figura 10. Circuito para el control PID  
Fuente: los autores

**Sintonía PidZiegler - Nichols**

Una forma para la sintonía del controlador PID consiste en el método expuesto por Ziegler-Nichols, el cual establece que si se tiene un sistema de primer orden con un retardo puro de la forma:

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Ecuación 9. Función de Transferencia Nichols

Este tiene un comportamiento como el mostrado en la figura 11.

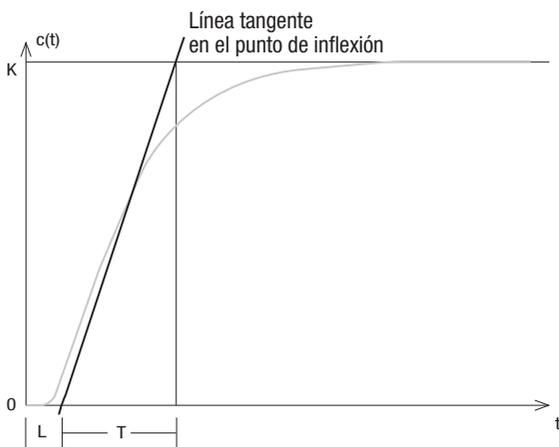


Figura 11. Comportamiento esperado del sistema para ser sintonizado por el método de Ziegler-Nichols  
Fuente: Lakeou et al. [5]

Entonces, el controlador PID se puede sintonizar considerando los siguientes criterios:

Tabla 3. Criterios de sintonía Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fuente: Lakeou et al. [5]

Para este caso, el controlador PID considerado es de la forma:

$$C(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$

Ecuación 10. Función de Transferencia PID

Es de apreciar que el circuito propuesto en la figura 10 para el controlador PID sigue la anterior ecuación. La ganancia proporcional se debe ajustar con el amplificador que se encuentra en el controlador de la figura 9.

**Implementación del Controlador PID**

Para el caso, experimentalmente se obtiene que  $L=0,2$  segundos y  $T=0,8$  segundos, por lo tanto:

- $K_p = 4,8$
- $T_i = 0,4 \text{ seg}$
- $T_d = 0,1 \text{ seg}$

La ganancia proporcional se montó con una resistencia de 10 K y un potenciómetro de 100 K. El tiempo integral se implementa con un condensador de 4μF y un potenciómetro de 100 K. Para el tiempo integral, se utilizó un condensador de 1μF y un potenciómetro de 100 K.

**Discusión**

Con la finalidad de observar el desempeño del sistema, se tomaron datos de su funcionamiento buscando examinar las características que este presenta. Los resultados de las mediciones de radiación del seguidor solar se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Datos del sistema de posicionamiento implementado

Hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura superficie (°C)	Reposicionamiento
10:00	928	25,3	Sí
10:05	145	20,1	No
10:10	168	18	No
10:15	225	18,2	No
10:20	270	18	Sí
10:25	850	22,4	Sí
10:30	183	20	No
10:35	872	22	No
10:40	904	25	No
10:45	970	24,5	No
10:50	932	25,3	Sí
10:55	223	22	No
11:00	450	20,3	No

Fuente: los autores

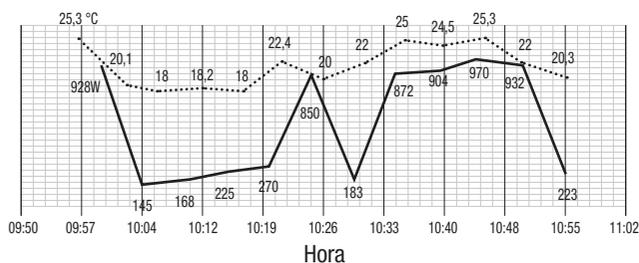
Medición de radiación (W - m<sup>2</sup>)  
y la temperatura (°C) del seguidor solar

Figura 12. Relación entre la radiación y la temperatura

Fuente: los autores

En los anteriores datos, es posible observar que el sistema de seguimiento tiene dificultades en realizar la corrección cuando la radiación solar está por debajo de 270 W/m<sup>2</sup>; adicionalmente, otro factor que influye para no tener un seguimiento continuo es la zona muerta que presenta el sistema mecánico formado por el motor y la cadena de transmisión de movimiento.

## Conclusiones

Se observó que la construcción del sensor, en la separación de las foto-celdas, es un aspecto crucial en el desempeño del sistema. Entre mayor sea la separación de las foto-celdas, el sistema de seguimiento presentará un comportamiento de histéresis más marcado.

Para el circuito propuesto del control *On-Off*, la ganancia del amplificador debe ser aproximadamente diez veces mayor. Se experimentó con una ganancia unitaria, observándose que el sistema no permitía realizar el seguimiento del sol.

Se observó que el control proporcional presenta un mejor desempeño que el control *On-Off*.

La alternativa propuesta en el circuito del control proporcional permite incorporar otras estrategias de control, como lo es el control PID.

Por motivos de la no linealidad de los sensores (foto-celdas) y el alto porcentaje de histéresis que se presenta, se determina no tomarlas como sensor, sino optar por encuadrar el seguidor solar por reloj y brújula digital.

También se estimó que todo fuera controlado desde software y no desde un hardware independiente.

Se determinó que los elementos de hardware que componen el sistema, así como sus partes mecánicas, hacen que este no sea lineal e invariante en el tiempo, en los momentos de ausencia del sol por nubosidad.

## Referencias

- [1] F. Sierra, E. Caro, F. Mejía. *Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar*. Primera edición. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2008, p. 20.
- [2] K. Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Cuarta edición. Madrid: Pearson. 2003, pp. 53-146.
- [3] Y. J. Huanget al. "Solar tracking fuzzy control system design using FPGA", en *Proceedings of the World Congress on Engineering*. Londres: IEEE, vol. I. 2009, pp. 1-3.
- [4] N. Nise. *Sistemas de control para ingeniería*. Primera edición. Madrid: Pearson Educación. 2002, pp. 50-100.
- [5] "Design of a low-cost digital controller for a solar tracking photo-voltaic (pv) module and wind turbine combination system", S. Lakeou *et al.* 21st European photovoltaic solar energy conference. Consultado: 20 de enero del 2011. Disponible en: [http://www.udc.edu/cere/docs/ICRE-DC\\_UDC\\_Final2.pdf](http://www.udc.edu/cere/docs/ICRE-DC_UDC_Final2.pdf)

