

Sistema de Posicionamiento Solar Utilizando la Plataforma de *LABVIEW* y el Microcontrolador 18F4550

Kelvin de Jesús Beleño Sáenz

Grupo de LOGOS, DEEST, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, rikelvin1984@gmail.com

Ivaldo Torres Chávez

Grupo de LOGOS, DEEST, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, tivaldo@hotmail.com

Aldo Pardo García

Grupo Automatización y Control A&C, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, apardo13@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo trata del desarrollo de un sistema de posicionamiento solar utilizando la plataforma de Labview 8.6 y el microcontrolador PIC18F4550 para elevar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA). Para la medida de las variaciones de intensidad de Luz se utiliza un arreglo de 5 celdas solares de la empresa KYOCERA combinada con 5 fotodetectores. El sistema se compone de un mecanismo formado por dos servomotores los cuales juntos con las celdas permitirán el posicionamiento de la estructura en la orientación adecuada. La tarjeta de adquisición se desarrolló con el microcontrolador PIC18F4550 que presenta ventajas en velocidad de respuesta y el número de líneas de instrucción. La interfaz se desarrolló en Labview 8.6 con la conexión USB de puerto virtual-serial, control de posicionamiento autónomo y manual. La velocidad del sistema es muy eficaz y rápida ante las variaciones de los cambios de estímulos de intensidad lumínica.

Palabras claves: Celdas fotovoltaicas, Labview, Microcontrolador, Control, Sistema de Posicionamiento.

ABSTRACT

In this paper we talk about the development of a solar positioning system using Labview-8.6 platform and the PIC18F4550-microcontroller to increase the efficiency of autonomous photovoltaic systems (SFA). To measure the variations in intensity of light using an array of 5 solar cells of the KYOCERA company's combined with 5 photodetectors. The system consists of a mechanism composed of two operators which together with the cells allow the positioning of the structure in the proper orientation. The acquisition board was developed with the PIC18F4550 microcontroller which has advantages in speed of response and the number of lines of instruction. The interface developed in Labview 8.6 with the USB virtual-serial port, control of autonomous and manual positioning. The speed of the system is very effective and fast to changes in the changes of light intensity stimuli.

Keywords: Photovoltaic cell, Labview, Microcontroller, Positioning system, Control.

1. INTRODUCCIÓN

La conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico se llama generación fotovoltaica. Algunos materiales como el silicio (Si), germanio (Ge), boro (Br), indio (In) entre otros, presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico. El cual es el proceso de absorción de fotones de luz liberando electrones libres generando un flujo de corriente que puede ser utilizada como energía eléctrica (Ibáñez, M. et al., 2004).

Los módulos fotovoltaicos están conformados por una matriz o arreglos de celdas fotovoltaicas, llamadas también celdas solares, las cuales se conectan de forma serial y en paralelo para obtener la eficiencia del panel (Ibáñez, M. et al., 2004; de Vos and Pauwels, 1981).

Las células solares individuales se conectan en serie o en paralela y dependiendo de las características individuales como corriente circuito de cortocircuito (I_{cc}), tensión de circuito abierto (V_o), tensión de punto máximo de potencia (V_m), corriente de punto de máxima potencia (I_m) y la potencia de máxima del panel (P_m) se obtiene la eficiencia del modulo bajo una radiación de 1000 W/m^2 a una temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (de Vos and Pauwels, 1981).

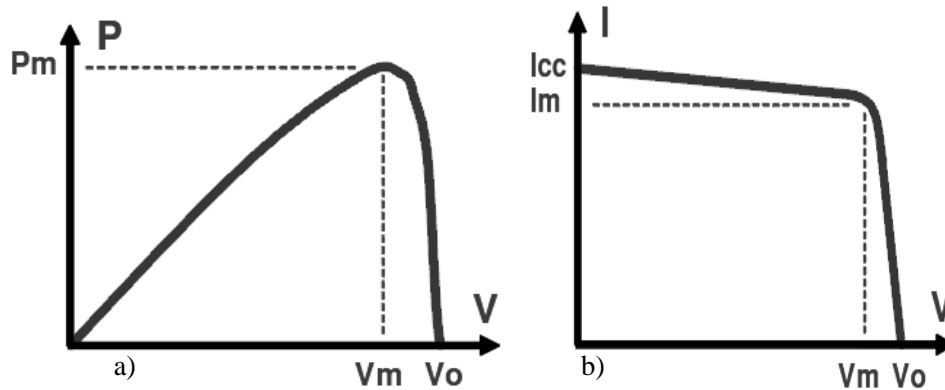


Figura 1. Curvas característica del panel fotovoltaico. a) Potencia -tensión de circuito abierto, b) corriente -tensión

Los módulos fotovoltaico pueden modelarse eléctricamente correspondiéndose con el modelo de una celda solar para obtener una ecuación que reproduce su comportamiento mediante un esquema muy sencillo tal y como se muestra en la figura 2 (Barrera et al., 2001).

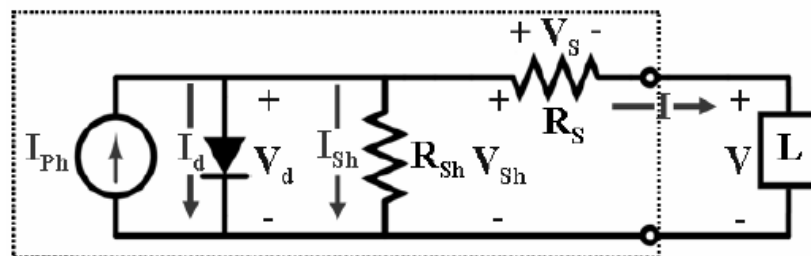


Figura 2. Modelo eléctrico equivalente de una celda solar con una carga L (Hussein et al., 1995)

Una celda solar puede ser vista como una fuente de corriente (I_{ph}), cuyo valor depende de la radiación solar incidente sobre ella. Dado que la celda solar está formada por una unión p-n, es posible modelar el comportamiento como un diodo conectado en paralelo con la fuente I_{ph} . Este diodo es el responsable de la tensión generada por la celda la cual depende de parámetros como: la temperatura (T°), la corriente del diodo (I_d), el factor de idealidad (η) (Hussein et al., 1995).

Además a las consideraciones anteriores se debe considerar las pérdidas presentes causadas por disipación de energía en forma de calor por lo que se agrega una resistencia en serie (R_s) y una resistencia en paralelo (R_{sh}), al modelo mencionado anteriormente. (Barrera et al., 2001; Hussein et al., 1995). El efecto de resistencia R_{sh} es más significativo para valores de voltaje bajos, y se traduce en una disminución del voltaje de circuito abierto respecto al modelo eléctrico de un solo diodo. En cambio, la corriente de cortocircuito no se ve afectada. De

forma análoga, el efecto de resistencia R_s , se traduce en una disminución de la corriente de cortocircuito, sin alterar el voltaje de circuito abierto (Hussein et al., 1995).

Del modelo eléctrico de la figura 2, aplicando Ley Ohms y Ley de voltajes de Kirchoff se obtiene la siguiente ecuación matemática asociada a la celda.

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\left(\frac{(V + R_s * I) * q}{n * k * T^o} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s * I}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Donde, I_{ph} es la corriente fotolumínica en Amperios, I_d es la corriente del diodo en amperios, I_{Sh} es la corriente por la resistencia *shunt* en Amperios, V_d es la tensión del diodo en Voltios, V_{Sh} es la tensión en la resistencia *shunt* en Voltios, V_s es la tensión en la resistencia serie en Voltios, I es la corriente de salida de la celda en Amperios, V es la tensión de la celda en Voltios, R_{Sh} es la resistencia *shunt* en Ohms, R_s es la resistencia serie en Ohms, η es el factor de idealidad del diodo, I_o es la corriente de saturación inversa del diodo en Amperios, q es la carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}C$), k es la constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} J^oK$), T^o es la temperatura de la celda en grados Kelvin.

El modelo matemático planteado en la ecuación (1) permite definir la característica I-V de una celda fotovoltaica. Dado que tanto la tensión V como la corriente I de la celda se encuentran dentro del exponente de la función exponencial (Van den Heever et al., 1989).

Existen diferentes tipos de paneles solares en función del material semiconductor que sea utilizado en su fabricación, dentro de los cuales se encuentran:

- Celdas de Silicio Monocristalino son las que alcanzan mayor eficiencia con un rendimiento del 25% aunque las que se comercializan son del 16 %.
- Celda Silicio Policristalino. La eficiencia de este tipo de material es menor que la del material monocristalino y visualmente la superficie presenta un aspecto granulado con un rendimiento del 19% y los módulos comerciales son del 14% esto permite que los costos sean menores.
- Celda Silicio Amorfo. Es el material de menor eficiencia que existe y por ende su precio es menor al material cristalino, su eficiencia es del 10% y comercialmente es del 8%.

Los sistemas fotovoltaicos están conformados básicamente por paneles solares, reguladores de tensión, baterías e inversores DC/AC tal y como se muestra en la figura 3.

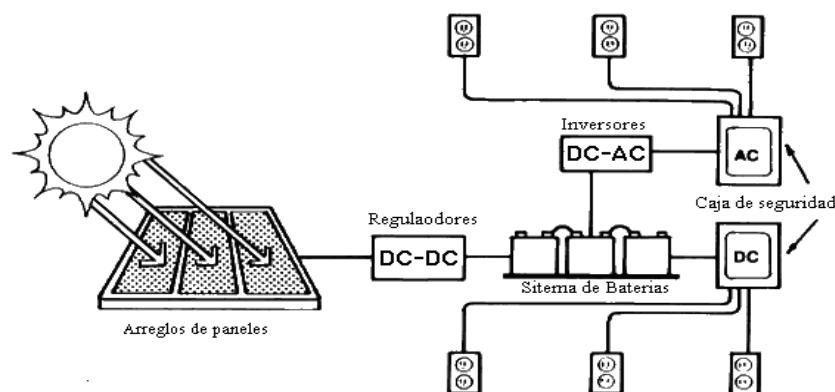


Figura 3. Sistema fotovoltaico integrado por paneles, inversores, baterías y reguladores de tensión.

Uno de las características importantes en los sistemas fotovoltaicos es la de mantener el suministro de energía eléctrica a la carga asociada todo el tiempo, e incluso en horas que no hay luz solar (Esrám and Chapman, 2007). Para esto existen diversas estrategias que han permitido mejorar la eficiencia del sistema fotovoltaico sin tener que sobredimensionarlo.

Una de las estrategias utilizadas en los sistemas fotovoltaicos es la de emplear elementos seguidores del movimiento del sol que favorezcan y aumenten la captación de la radiación solar entre los cuales se encuentran (Van den Heever et al., 1989; Esram and Chapman, 2007).

- Soporte estático. Es el sistema más habitual que se encuentra en las instalaciones y su configuración se ubica el sistema dependiendo de la latitud y longitud del lugar teniendo en cuenta la inclinación más adecuada para captar la mayor radiación solar posible (Esrám and Chapman, 2007).
- Sistemas de seguimiento solar de 1 eje. En esta configuración el soporte realiza un seguimiento solar. La rotación del soporte se hace por medio de un solo eje, bien sea horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento es el más sencillo y el más económico resultando sin embargo incompleto ya que sólo podrá seguir o la inclinación o el máximo zenit del Sol, pero no ambas a la vez (Esrám and Chapman, 2007).
- Sistemas de seguimiento solar de dos ejes. Con este sistema ya es posible realizar un seguimiento total del sol en altitud y en Zenit, siempre se conseguirá que la radiación solar incida perpendicularmente obteniéndose la mayor captación posible.
- Sistemas mecánicos. En esta configuración el seguimiento se realiza por medio de un motor y de un sistema de engranajes. Dado que la inclinación del sol varía a lo largo del año por esto es necesario realizar ajustes periódicos, para adaptar el movimiento del soporte mediante dispositivos de ajuste automático o ajustando la posición mediante sensores que detectan cuando la radiación no incide perpendicular al panel (Esrám and Chapman, 2007).

En este trabajo se habla de un sistema de control y supervisión remota para un sistema fotovoltaico utilizando el posicionamiento autónomo siguiendo la intensidad del brillo solar. El sistema consta de dos ejes y se ubica en el plano del eje X y el eje Z logrando mantener la máxima incidencia solar en los paneles solares de forma perpendicular.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del proceso experimental se diseñó un sistema fotovoltaico con un arreglo de 5 células solares de silicio policristalino de la empresa KYOCERA con las características bajo unas condiciones de irradiación de 1000 W/m^2 a una temperatura de ambiente de 25°C presentadas en la tabla 1. Para la ubicación de las células solares en el soporte de captación, se colocó en forma de cruz dos láminas de 5 cm de ancho por 40 cm de largo donde cada célula se ubica de tal forma que simule las orientaciones en la dirección: norte, sur, este y oeste dejando una celda de referencia en el centro. La relación de orientación en el manejo de la programación se le asignó un nombre de referencia según su ubicación en el soporte de captación de la siguiente manera:

- Orientación Norte sensor Uno
- Orientación Centro sensor Dos (Referencia)
- Orientación Sur sensor Tres
- Orientación Este sensor Cuatro
- Orientación Oeste sensor Cinco

Al sistema fotovoltaico se le integró un arreglo de 5 fotoceldas las cuales miden la intensidad de luz y trabajan como soporte de medida de las celdas. Para configurar las fotoceldas se calibraron realizando medidas en

ausencia de luz obteniendo un valor resistivo de 2000 K Ω y una medida con máxima incidencia de luz para la cual se obtuvo un valor de 40 Ω . Para evitar irradiación parasitas por efecto de reflexión en el soporte de captación, se cubrió la estructura con una capa de material carboncillo antirreflectante de color negro mate el cual se encarga de absorber los rayos de luz que incidan fuera de las celdas y ocasionen efectos de recombinación en las celdas que generen pérdidas por flujo de corrientes parásitas.

Tabla 1. Características eléctricas de las celdas solares

Máxima potencia (Pm)	0,75	Watt
Máximo voltaje de trabajo óptimo (Vm)	4,70	Vol
Máxima corriente activa óptima (Im)	160,00	mA
Voltaje de circuito abierto (VOC)	5,00	Vol
Corriente de corto circuito (ICC)	180,00	mA

Para la estructura de posicionamiento se diseñó un sistema de dos ejes que se conformado por dos servomotores soportado por una estructura fabricado en aluminio de 70 cm de alta y una base de 25 cm². En la figura 4 se presenta el sistema diseñado con las células solares y los servomotores.



Figura 4. Sistema diseñado de posicionamiento de dos ejes con celda solares

Para capturar la data, la supervisión y el control de todo el sistema de posicionamiento de la estructura se diseñó una tarjeta de adquisición con el microcontrolador PIC18F4550 con memoria EEPROM de 256 bytes, máximo número de instrucciones simples 16.384 y una memoria flash de 32 Kbytes con comunicación por puerto USB. La tarjeta tiene una entrada de 8 puertos análogos con una resolución de 8 bits; lo suficiente para leer los voltajes en las células solares y la lectura de las fotoceldas que permiten saber de la cantidad de luz que está incidiendo en las celdas y no tener pérdidas en la información que altere el su funcionamiento.

También se desarrolló una interfaz gráfica en la plataforma de Labview 8.6 la cual comunicara la tarjeta con el sistema de posicionamiento, así como la captura en tiempo real de la data tomada del monitoreo de la intensidades de luz y muestra el estado de los sensores que hacen posible el posicionamiento de la estructura. Desde esta interfaz se puede tener la opción de controlar manual o automáticamente la estructura. La estrategia de control desarrollada permite que el sistema se oriente e incline de forma secuencial con el objeto de mantener la estructura de células fotovoltaicas perpendicular a la incidencia del los rayos del sol, el intervalo de seguimiento de la orientación va desde un rango de 0 a 180 grados en dirección este a oeste.

Para medir la capacidad de respuesta del sistema de posicionamiento se indujo artificialmente 4 perturbaciones utilizando 4 fuentes de luz blanca con una potencia de 100 Watt ubicadas en la misma posición de las celdas

(norte, sur, este y oeste). Ésta luz emite longitudes de onda comprendidas entre el violeta ($\approx 300\text{nm}$) y el infrarrojo cercano ($\approx 900\text{nm}$) la cual es suficiente para que las celdas funcionen debido a que el rango de absorción de luz según las especificaciones técnicas está entre los 400 a 800 nm. De manera controlada y secuencial se encendieron las fuentes simulando el avance del sol durante el día haciendo incidir en ciertas regiones más cantidad de luz que en otra lo que ocasionaba el movimiento de todo el sistema de posicionamiento en busca de la mayor incidencia de luz.

3. RESULTADOS

La figura 5 muestra el diagrama en bloques funcional del sistema con las respectivas etapas de control, supervisión y adquisición de señales (Sistema SCADA). El cual cuenta con la opción de control a distancias remotas mediante redes fundamentadas en el protocolo TCP/IP.

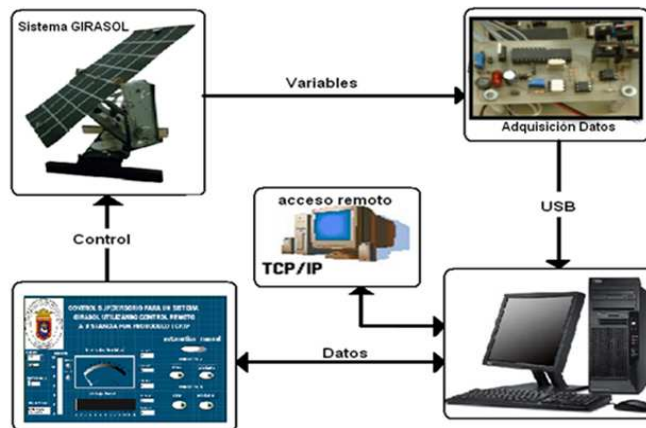


Figura 5. Diagrama en bloques funcional del sistema implementado.

La interfaz desarrollada en Labview 8.6 (ver figura 6) para la parte de supervisión, además de permitir la comunicación con la tarjeta a través de una conexión USB emulada con un puerto virtual serial, también tiene la opción de controlar la estructura de posicionamiento por acceso remoto con el protocolo TCP/IP configurando el servidor Web de Labview desplegando un VI por medio de una solicitud de un cliente. Para esto se configuró como un servicio Web VI a través de la opción *Web Service* (RESTful).

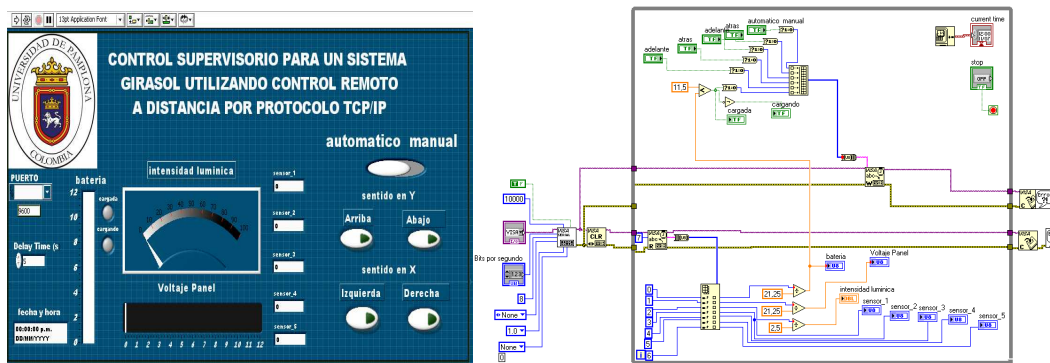


Figura 6. Interfaz gráfica desarrollada en Labview 8.6 para la supervisión, monitoreo y control del sistema de posicionamiento

Las salidas digitales permiten hacer un control del sistema de posicionamiento controlando el sentido de giro de los servomotores, para esto la interfaz da la opción que el control se haga de forma manual o de manera

automática, donde el sistema según las medidas de intensidad de luz incidente toma la mejor decisión y elige su mejor ubicación teniendo siempre como referencia la celda central.

Para esto el sistema inicialmente se ubica una posición de reset donde él asume que la incidencia de luz en todas las celdas es mínima, cuando las celdas en conjunto fotodetectores empieza a medir la intensidad real de luz incidente, entonces la programación hecha en el microcontrolador toma la decisión hacia que ubicación debe estar el sistema. En la figura 7 se presenta el diagrama de flujo utilizado para la programación en el sistema de posicionamiento.

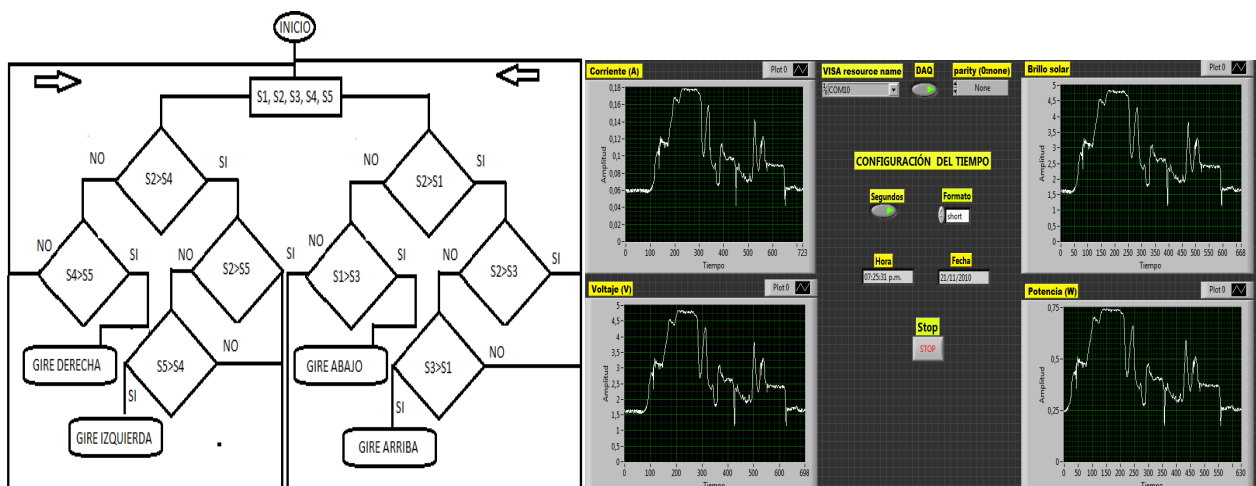


Figura 7. Diagrama de flujo y media de la respuesta del comportamiento del sistema de posicionamiento perturbado con cambios de intensidades de luz

La data capturada presentaba ruido debido a diferentes perturbaciones del medio como lo es la agitación térmica de los elementos, ruido blanco, entre otras cosas. Por lo cual cada histórico registrado por las celdas y los fotodetectores de las mediciones de intensidad lumínica se le hizo un pre-procesamiento utilizando un filtro digital de orden 8 basado en la teoría del triángulo de Pascal (Vera y Torres, 2010). Esto permitió disminuir el ruido presente en las medidas y poder analizar mejor el comportamiento de la gráfica como se muestra en la figura 8.

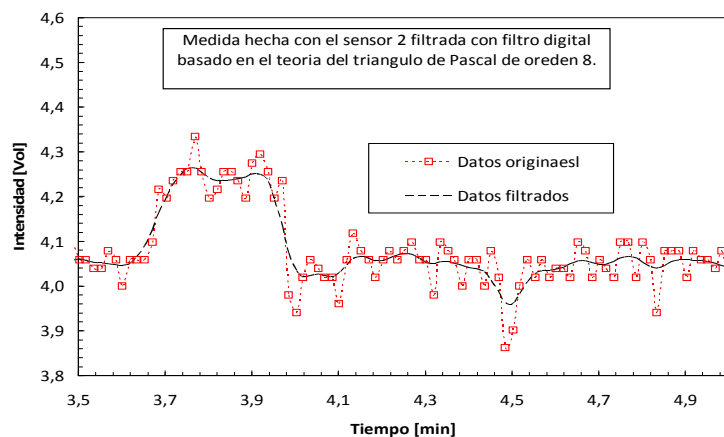


Figura 8. Señal tomada del sensor dos filtrada digitalmente con la teoría de Pascal.

En la figura 9 se presenta la respuesta del sistema luego de haberle inducido 4 perturbaciones secuenciales para excitar las celdas solares y obligar a que el sistema se ubique en la mejor posición donde la incidencia de luz es mayor. En la figura 9 también se puede apreciar que al inicio el sistema presenta un comportamiento equilibrado donde la celda de referencia la cual es el sensor 2 registra la mayor incidencia de luz y los sensores 4 y 5 registran la menor incidencia de luz. Para los sensores 1 y 3 que simulan las orientaciones de Este y Oeste presentan un nivel cercano a la señal de referencia lo cual es coherente debido a que el sistema debe seguir el movimiento del sol el cual ocurre en esta dirección.

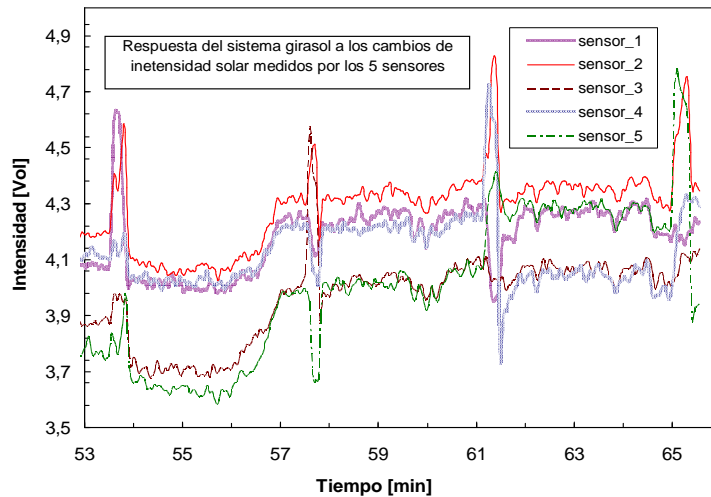


Figura 9. Medida de la respuesta del sistema de posicionamiento ante las perturbaciones de Luz inducidas experimentalmente

En la figura 10 se presenta la respuesta del sistema ante las perturbaciones inducidas experimentalmente. a) Respuesta de los sensores 1 y 3, 10.b) Respuesta de los sensores 4 y 5. Para la figura 10.a) la fuente correspondiente a la orientación Sur se apaga dejando las otras encendidas. Se puede ver que este cambio ejerce para los sensores 1,2 y 3 una sobremedida del nivel medido, esto significa que se ha registrado un cambio en la medida de la intensidad, donde el sensor 1 iguala la intensidad lumínica medida por el sensor 2 mientras que el sensor 3 registra un cambio mínimo. Estos cambios de nivel son comparados en el programa implementado en el microcontrolador y dan la orden a los servo motores que deben moverse en dirección norte (Sensor 1) pues es allí donde se registra el mayor nivel de intensidad este movimiento se ejecuta hasta el nivel de señal medida por el sensor 2 (referencia) sea mayor. El tiempo que tarda el proceso en responder a los estímulos es de 2 a 3 segundos logrando un equilibrio total en 4 segundos lo que indica que el sistema integrado por la tarjeta, la estructura, la interfaz y las celdas solares responde rápidamente.

En el segundo tramo de la figura 10.a) se observa que el nivel de intensidad registrado esta en el sensor 3 (región Sur) pues este presenta un pico por encima del nivel de referencia del sensor 2. Esto se correlaciona a la segundo estímulo inducido donde se apaga la fuente que simula la región norte y se aprecia en el bajo nivel que registra el sensor 1. Al igual que en el estímulo anterior el tiempo de respuesta está de 2 a 3 y alcanza el equilibrio total en 4 segundos.

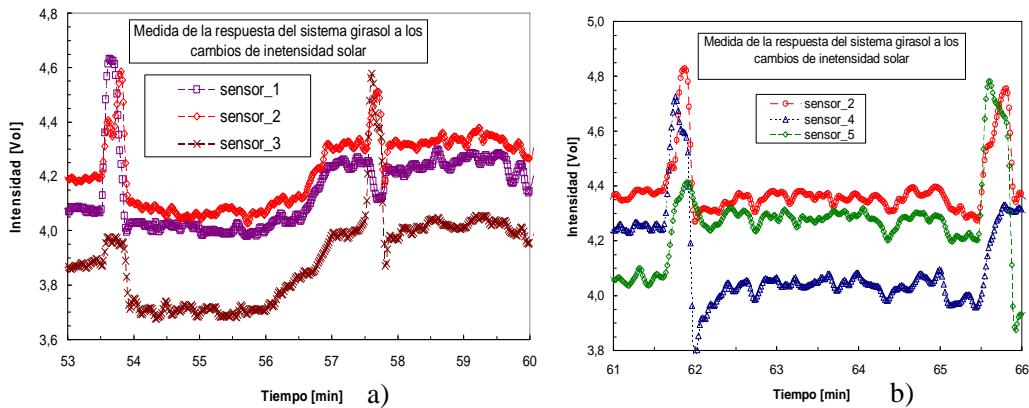


Figura 10. Respuesta del sistema de posicionamiento. a) Respuesta de los sensores 1 y 3, b) Respuesta de los sensores 4 y 5

En la figura 10.b) se puede ver que en el primer tramo el sensor 4 registra un sobre nivel de intensidad correlacionadote con el estímulo inducido el cual es apagar la fuente correspondiente al Oeste, también se puede ver que el sensor 5 registra menor intensidad de luz y al igual que en la figura 10.a) el nivel de referencia se mantiene con un nivel de señal constante. En el segundo tramo se observa que el sensor 5 registra un cambio de nivel de intensidad lumínica el cual indica que la fuente de la dirección Oeste emite mayor cantidad de Luz que la fuente de la dirección Este correlacionándose con el ultimo estímulo. El tiempo de respuesta del sistema es de 2 a 3 segundos logrando obtener la estabilidad en 4 segundos lo que indica que el sistema responde rápidamente a los cambios de estímulo en la incidencia de la Luz.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de posicionamiento solar con un tiempo de respuesta de 4 segundos para lograr el equilibrio integrado con una tarjeta de adquisición de datos, utilizando el microcontrolador PIC18F4550 una interfaz gráfica hecha en Labview 8.6 y un arreglo de 5 celdas solares.

El algoritmo desarrollado se basa en la toma de decisiones y en la comparación de las medidas de las intensidades de Luz incidente obtenidas en tiempo real del arreglo de celdas solares lo que permitió obtener una respuesta corta del sistema respondiendo de forma eficaz a cualquier cambio de luz generada.

5. FUTUROS TRABAJOS

Como trabajo futuro está la implementación de la lógica difusa al sistema desarrollado para optimizar el tiempo de respuesta y generar una memoria de eventos que permitan realizar un seguimiento exacto a la eficiencia del sistema. De igual forma las características del sistema permiten realizar el seguimiento en tiempo real del máximo punto de potencia generado por el arreglo de celdas solares.

6. REFERENCIAS

Ibáñez, M., Rosel, J.R. y Rosel, J.I. (2004). *Tecnología Solar*. Editorial Mundi Prensa, Madrid, España.

- de Vos, H. and Pauwels, A. (1981). "On the thermodynamics limit of photovoltaic energy conversion". *Applied Physics*, pp. 119-125.
- Barrera, J., et.al. (2001). *Fuentes de Energías Alternativas*.
- Hussein, K.H., Muta, I., Toshino, T. and Osakada, M. (1995). "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions" *Generation, Transmission and Distribution IEE proceedings*, Vol. 142, No. 1, pp. 59-64.
- Van den Heever, P. D., Oberholzer, S. and Enslin, J.H.R. (1989). "High-efficient solar panel/wind turbine converter with maximal power control," in *Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 663-668.
- Esrām, T. and Chapman, P.L. (2007). "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449.
- Meinel, A.B. y Meinel, M.P. (2001). *Aplicaciones de las energías solares* Editorial Reverte, Madrid, España.
- Vera C.A. y Torres, I. (2010). "Teoría de pascal como filtro digital implementado por software para el filtrado del ruido generado por un motor de inducción tipo jaula ardilla". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 1, N. 15, pp. 47-52.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito