

**APPLIED CONTROL TO A MECHANICAL STRUCTURE FOR THE
AUTOMATIC POSITIONING OF PV MODULES****CONTROL APLICADO A UNA ESTRUCTURA MECÁNICA PARA EL
POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS****MSc. Kelvin Beleño Sáenz*, PhD. Aldo Pardo García**, PhD. Ivaldo Torres Ch.***** **Universidad Autónoma del Caribe**, Facultad de Ingenierías.

Calle 90, No. 46-112, Barranquilla, Colombia. Email: kelvin.beleno@uac.edu.co

** **Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingenierías y Arquitectura.

Pamplona Norte de Santander, Colombia.

Email: apardo13@unipamplona.edu.co, tivaldo@hotmail.com.

Abstract: This paper deals with the design of a mechanical structure to a system of automatic positioning of cells or photovoltaic modules, which allows locating the cells to a solar incidence angle of 90° , which allows better performance in converting sunlight into is electrical energy. The design of the mechanical structure development in the mechanical design software SolidWorks, which was achieved by analysis for the selection of materials used.

Keywords: Control, Mechanical Structure, Solar.

Resumen: Este trabajo trata del diseño de una estructura mecánica para un sistema de posicionamiento automático de celdas o módulos fotovoltaicos; el cual permite ubicar las celdas a un Angulo de incidencia solar de 90° , lo cual permite obtener un mejor rendimiento en cuanto conversión de luz solar en energía eléctrica se trata. El diseño de la estructura mecánica se desarrolló en el software de diseño mecánico *SolidWorks*, mediante el cual se consiguió realizar análisis para la selección de materiales a utilizar.

Palabras clave: Control, Estructura Mecánica, Energía Solar.

1. INTRODUCCIÓN

Los módulos fotovoltaicos son sistemas que permiten la captación de la luz emitida por el sol y su conversión directa en energía eléctrica. Estos módulos están conformado físicamente por la unión de celdas o células solares, las cuales se conectan en serie o en paralelo 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); que denotan la eficiencia del módulo bajo una radiación de 1000 W/m^2 a una temperatura ambiente de 25°C (V_{os} y

Pauweis, 1981; Barrera et al, 2001; Hussein y Muta, 1995; Efram y Chapman, 2007).

Cada celda solar puede modelarse eléctricamente 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).

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 (h) (Hussein y Muta, 1995).

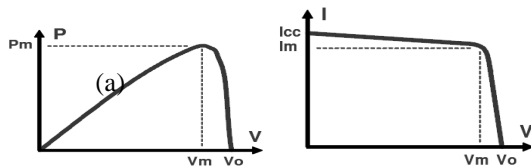


Fig. 1. Curvas característica del panel fotovoltaico. a) Potencia -tensión de circuito abierto, b) corriente -tensión

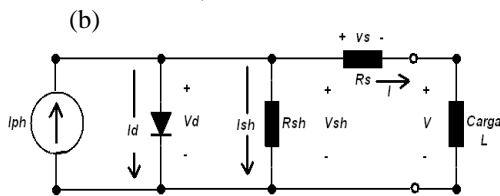


Fig. 2: Modelo eléctrico equivalente de una celda solar con una carga L (Esrám y Chapman, 2007).

Del modelo eléctrico de la figura 2, y aplicando sencillas leyes que rigen el análisis básico de circuitos, se puede obtener el modelo que matemáticamente expresa el comportamiento de una celda solar.

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

De acuerdo al proceso y a los materiales utilizados para la fabricación se pueden obtener distintos tipos de celdas solares, las cuales se diferencian unas de otras en la capacidad que tienen estas de convertir la luz solar en energía eléctrica, también conocida como Eficiencia.

Entre las más comunes tenemos: Celdas de Silicio Monocristalino, Celdas de Silicio Policristalino y Celda de Silicio Amorfo. Siendo las primeras unas de las más utilizadas debido a que presentan un mejor rendimiento (alrededor del 25%).

La unión de los módulos fotovoltaicos con otros dispositivos como reguladores de tensión, baterías e inversores DC/AC, conforman lo que usualmente se conoce como Sistemas Fotovoltaicos. Básicamente estructurados como se muestra en la figura 3.

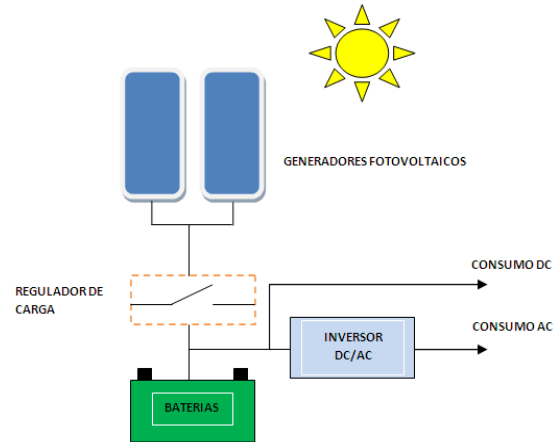


Fig. 3: Sistema fotovoltaico integrado por paneles, inversores, baterías y reguladores de tensión.

Uno de las características importantes en los sistemas fotovoltaicos es la de mantener el suministro de energía eléctrica a una carga asociada todo el tiempo, e incluso en horas que no hay luz solar (Beleño et al, 2011; Hermosillo, 1995; Gonzales, 2008). Para esto existen diversas estrategias que han permitido mejorar la eficiencia del sistema fotovoltaico sin tener que sobredimensionarlo, entre estas diferentes estrategias de control en los inversores de DC/AC (Pardo y Díaz, 2004).

Una de las estrategias utilizadas en los sistemas fotovoltaicos es la de utilizar elementos que sean capaces de seguir la trayectoria solar para de esta forma lograr el aumento en la captación la radiación solar durante el día (Domínguez, 2005).

En este trabajo se habla de un sistema de control y supervisión de una estructura mecánica para el posicionamiento automático de celdas o módulos fotovoltaicos; permitiendo ubicar las celdas a un Angulo de incidencia solar de 90° ; aplicando técnicas clásicas de control.

Este trabajo investigativo nace fundamentado en el artículo: *Sistema de Posicionamiento solar utilizando la Plataforma de Labview y el microcontrolador PIC18F4550* (Beleño et al, 2011).

Con el objetivo de plantear una estrategia de control para optimizar el funcionamiento de dicha estructura se plantea la implementación física de un sistema más robusto adaptable a entornos reales, mediante técnicas y herramientas de diseño mecánico, y técnicas clásicas de control.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

Para la construcción de la estructura mecánica que soporta los paneles; se diseñaron todas las piezas en el Software de diseño *SolidWork*, en el cual además luego de un sencillo pero importante análisis de detalles en la simulación de esfuerzos de dichas piezas, también se logró determinar el material con mejores condiciones o características para la elaboración de estas. En la figura 4 se puede observar como quedó el diseño final.

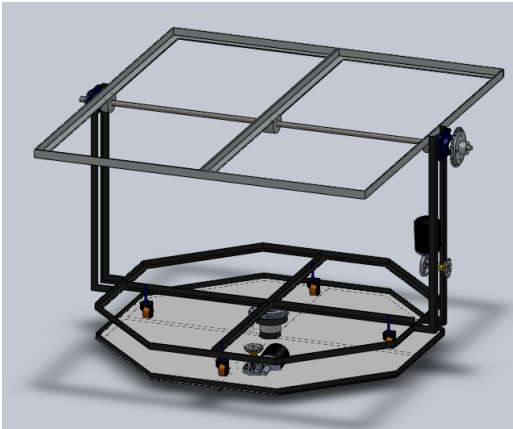


Fig. 4: Estructura diseñada en SolidWork con el acople de cada una de las piezas que la componen.

Esta estructura está diseñada para soportar en ella dos paneles; cada uno con dimensiones 1.20 Mts de largo por 0.6 Mts de ancho.

Para el movimiento en los dos ejes (Norte a Sur y Este a Oeste) se utilizaron dos Motor-reductores de tornillo sin fin corona (Figura 5), con los que se garantiza un menor consumo de energía en comparación a otro tipo de motores de corriente directa, ya que al detectar la estructura una posición adecuada estos se desactivan y quedan auto enclavados en esa posición hasta un nuevo aviso.

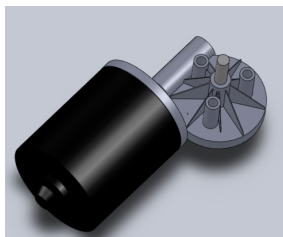


Fig. 5: Motor-reductores de tornillo sin fin corona para el movimiento en cada eje.

Las características mecánicas y eléctricas de estos motores se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del motor

Parámetro	Valor
K	2.7 Nm/A
L	5.8 MH
R	76 Ω
B	0
J	$1 \cdot 10^{-6}$ Kg/m ²

Donde:

K = Constante de par del motor.

L = Inductancia Eléctrica.

R = Resistencia eléctrica.

B = Coeficiente de Rozamiento.

J = Inercia del motor.

Para conocer el tipo de controlador a utilizar para controlar el movimiento de los motores, fue necesario obtener el modelo electromecánico del motor, para de esta forma definir la función de transferencia de la planta. El modelo eléctrico que se representa para obtener esta función se puede observar en la Figura 6.

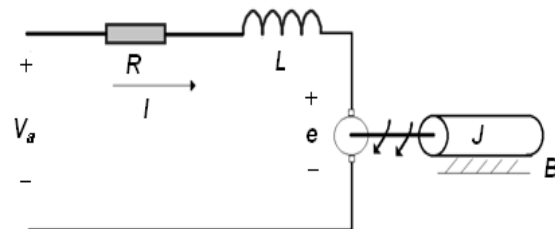


Fig. 6: Modelo eléctrico del motor.

Conociendo los parámetros del motor (Tabla 1), y obteniendo la relación salida entrada se obtiene la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{2.7}{5.8 \cdot 10^{-9} s^3 + 7.7 \cdot 10^{-5} s^2 + 7.29 s} \quad (2)$$

Luego de obtener el modelo matemático de la planta; se simula en *Matlab* y se obtiene el controlador para cada uno de los motores, de tipo PI (Proporcional Integrador).

Se acopló al sistema y se implementó el lazo de control en *Simulink* de *Matlab* (ver figura 7a) y se simuló aplicando una entrada escalón unitario, para analizar su comportamiento, con lo cual se logró la respuesta que se observa en la figura 7b.

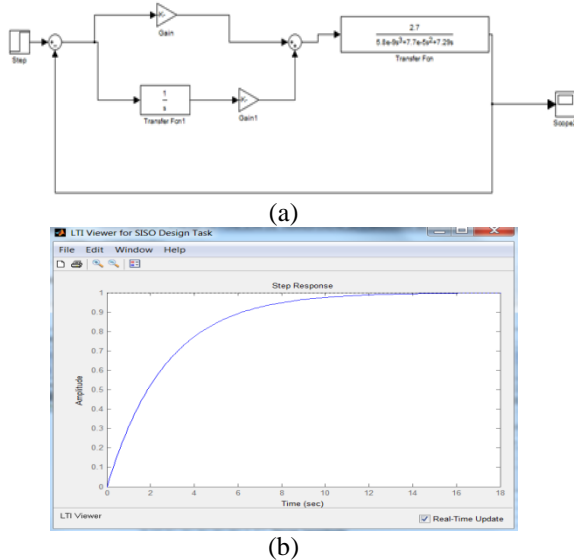


Fig. 7: a). Sistema de Control en Lazo Cerrado. b). Respuesta del Sistema ante una entrada escalón.

Para el desarrollo de la etapa de sensórica 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 2. Las células o celdas solares se ubicaron en el soporte de captación, en forma de cruz (ver figura 8), dispuestas 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

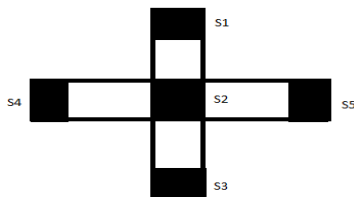


Fig. 8: Forma de ubicación de las celdas en la estructura

Para la etapa de supervisión se desarrolló una interfaz gráfica en la plataforma de Labview 8.6, el análisis del comportamiento, 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.

Tabla 2. Características eléctricas de las celdas

Máx. potencia (Pm)	0.75	Watt
Máx. voltaje de trabajo óptimo (Vm)	4.70	Vol
Máx. corriente activa óptima (Im)	160.00	mA
Voltaje de circuito abierto (VOC)	5.00	Vol
Corriente de corto circuito (ICC)	180.00	mA

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 de 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. Y de 0 a 120 grados en dirección norte a sur.

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 que permiten saber de la cantidad de luz que está incidiendo en las celdas y no tener pérdidas en la información que altere su funcionamiento.

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 ($\sim 300\text{nm}$) y el infrarrojo cercano ($\sim 900\text{nm}$) 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 interfaz desarrollada en *LabVIEW* (Ver figura 9), cuenta con un sistema que permite monitorear y tomar muestras cada 0.5 segundos de las medidas que suministran las células solares, así como realizar la captura de los datos en una carpeta designada por el personal supervisor, para un posterior análisis de estos; Utilizando la herramienta *Write To Measurement File*, esta genera un archivo *.lvm* el cual nos permite abrir el archivo en un documento de *Excel*. Además de indicar mediante señal tipo Booleana el estado (ON-OFF) de los motores que permiten realizar el movimiento de la estructura para lograr la posición.

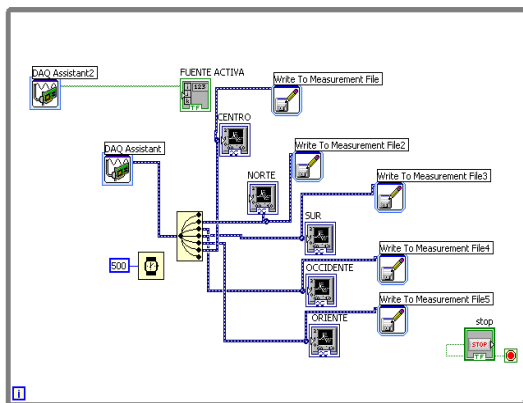
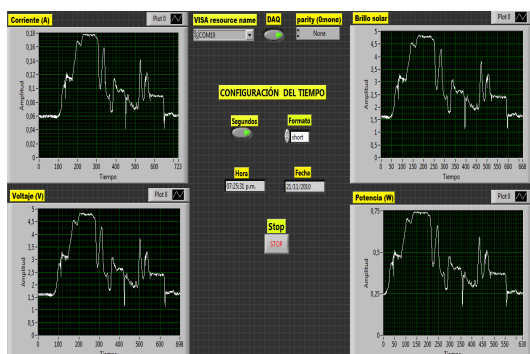


Fig. 9: Interfaz gráfica desarrollada en Labview 8.6 para la supervisión, monitoreo y control del sistema de posicionamiento

Las señales recibidas desde las celdas solares permiten hacer un control del sistema de posicionamiento controlando el sentido de giro de los motores de manera automática, ubicando la estructura hasta 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.

El sistema está diseñado para que guarde una posición inicial en donde se asume que se tiene la máxima incidencia al iniciar un ciclo de emisión de

luz solar durante el día, pero si dado el caso se presenta que esta estructura se llega a mover debido a factores externos; esta ubicara automáticamente en la mejor posición de incidencia solar garantizando un óptimo rendimiento de sistema.

La lógica implementada para la detección de la incidencia solar, se puede ver en la figura 10, en la cual se realiza la toma de decisiones tomando como Set Point las medidas suministradas por el sensor de referencia (S_2 = Sensor Centro), para a partir de estas generar movimiento para la posición en los motores.

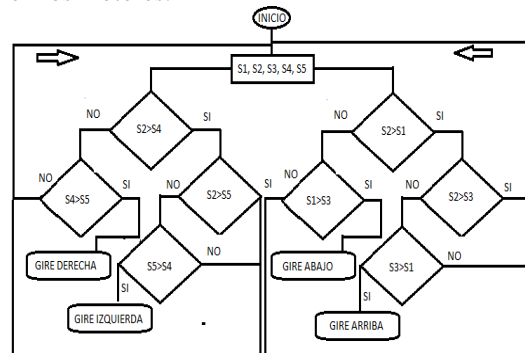


Fig. 10: Lógica de la Programación utilizada para el sistema de sensores utilizados como Set Point.

Luego de realizar la captura de datos, fue necesario realizar el procesamiento de estos, ya que la señal se obtenía gráficamente presentó una gran cantidad de ruido debido a perturbaciones generadas por factores externos. Este proceso consistió en la normalización y filtrado utilizando técnicas convencionales para este proceso (Teoría del filtro de Pascal (Vera y Torres, 2009). Ver Figura 11).

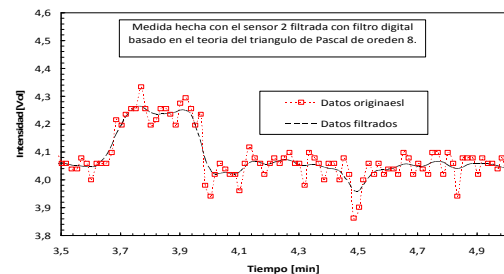


Fig. 11: Señal tomada del sensor dos filtrada digitalmente con la teoría de Pascal.

En la figura 12 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.

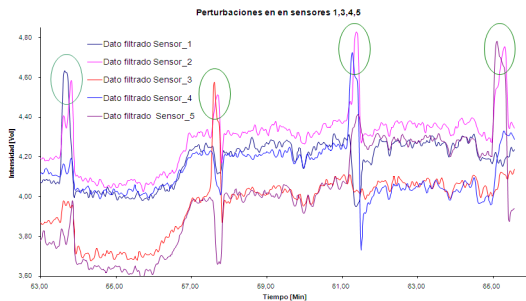


Fig. 12: Medida de la respuesta del sistema de posicionamiento ante las perturbaciones de Luz inducidas experimentalmente

Para la generación de estas perturbaciones, la fuente de luz incidente 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 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 tramo comprendido entre los 67 y 69 minutos de la figura 12, se observa que el mayor nivel de intensidad registrado está 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 seg.

En la figura 12 se puede ver que en el tramo comprendido entre los 61 y 63 minutos, el sensor 4 registra un sobre nivel de intensidad correlacionado 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 para el caso anterior el nivel de referencia se mantiene con un nivel de señal constante.

En el segundo tramo que comprende desde los 63 minutos en adelante 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 último 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 ha desarrollado un sistema capaz de seguir la trayectoria solar durante el día, con el objetivo de ubicar los módulos solares pertenecientes a un sistema de generación fotovoltaica; a un Angulo de incidencia de 90 grados con respecto a la irradiación solar. Consiguiendo así mejorar el rendimiento de estos módulos en cuanto a conversión de energía solar a eléctrica se refiere.

La estructura para el soporte de los paneles se diseñó en el programa de diseño mecánico Solid Work, en el cual se pudo hacer un análisis del esfuerzo de acuerdo al peso que estas estructuras soportan, seleccionando así el material con mejores características para el desarrollo de esta.

Para el control de movimientos se implementó un controlador clásico tipo PI, el cual fue posible conseguir gracias a la herramienta de identificación de Matlab SISOTOOL, con la cual de acuerdo al modelo electromecánico de la planta se obtuvo el controlador y su compensación. Este tipo de controlador resulta ser de óptimas condiciones, ya que en el movimiento realizado por los motores no se requiere alta velocidad, sino que más bien se requiere precisión. También se desarrolló un sistema para la supervisión de la estructura utilizando el software de ambiente LabVIEW, en el cual se pudo capturar los datos correspondientes a las medidas suministradas por los sensores para su posterior procesamiento y análisis.

Para la validación y comprobación del sistema se generaron perturbaciones a cada uno de los sensores de la estructura, utilizando fuentes de luz artificial (Bombillas de luz incandescente de 100 Watts), verificando el tiempo de respuesta del controlador y su correcto funcionamiento.

REFERENCIAS

- de Vos, H. and Pauwels, A. (1981). On the thermodynamics limit of photovoltaic energy conversion Applied Physics, Pages 119-125.
- Barrera, J., Holguin, G., et al. (2001). Fuentes de Energías Alternativas.
- Hussein, K. H. and Muta, I. (1995). Hoshino, M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions" Generation, Transmission and Distribution IEE proceedings, Vol: 142 Issue: 1 pp. 59-64.
- Esrám, 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.
- Beleño, K., Pardo, A., Torres, I., et al. (2011). Sistema de Posicionamiento solar utilizando la Plataforma de Labview y el microcontrolador PIC18F4550, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada Vol 2, No. 18.

- Vera, C. y Torres, I. (2009). 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. Número 15.
- Hermosillo, J.. (1995). "Energía solar". ITESO Jalisco México.
- Prosperi, M. y Minelli, C. (2005). "Energía solar fotovoltaica", proyecto europeo RES & RUE Dissemination – Programa ALTENER.
- Domínguez, R. (2005). "Componentes de un sistema fotovoltaico", Ingeniería energética general.
- Pardo, A., Díaz, J. (2004). Aplicaciones de los convertidores de Frecuencia. Estrategia PWM, Primera Edición, Editorial Universidad de Pamplona.

SITIOS WEB

- F. Gonzales. (2008). "Sistemas de generación distribuida". (Consultado el 24 de febrero 2012):
<http://www.gialec.org/fglongatt/sistgd.html>