

**ROBOTIC SOLAR TRACKING MODULE USING MPPT SUPERVISED AND  
CONTROLLED BY ETHERNET****MÓDULO ROBÓTICO DE SEGUIMIENTO SOLAR USANDO MPPT  
SUPERVISADO Y CONTROLADO VÍA ETHERNET**

**MSc. Carlos Arturo Vides Herrera, PhD. Aldo Pardo García  
PhD. Ivaldo Torres Chávez**

**Universidad de Pamplona.** Facultad de Ingenierías y Arquitectura.  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: (+577) - 568 5303, Fax: (+577) - 568 5303, Ext. 144.

E-mail: carlosarturvi@hotmail.com, tivaldo@hotmail.com, apardo13@hotmail.com.

**Abstract:** The present work is the development of a robotic module for tracking maximum power point in a solar system, which in turn is controlled and monitored via Ethernet. Basically the robotic system is automatically oriented to where is as much solar radiation which is what allows me to get the most power in a given instant of time. The software used for the monitoring and control system is LabVIEW 2011.

**Keywords:** MPPT, solar panel, robotic structure, microcontroller, ethernet, 3D.

**Resumen:** El presente trabajo consiste en el desarrollo de un modulo robótico para el seguimiento del punto máximo de potencia en un sistema solar fotovoltaico, que a su vez es controlado y supervisado por vía Ethernet. Básicamente el sistema robótico se orienta automáticamente hacia donde halla mayor cantidad de radiación solar la cual es la que me permite obtener la mayor potencia en determinado instante de tiempo. El software utilizado para él la supervisión y control del sistema es LabVIEW 2011.

**Palabras clave:** MPPT, panel solar, estructura robótica, microcontrolador, ethernet, 3D.

## 1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética es un problema que a todos nos afecta, un ejemplo de esto es el aumento de Los problemas energéticos en la actualidad afecta a todos los países, el aumento del costo de la energía y la búsqueda de nuevas fuentes energética son de gran actualidad. Fuentes alternativas como lo son la eólica, solar, mareomotriz, geotérmica son estudiadas para convertirla en energía eléctrica, y que esta conversión sea lo más eficiente posible. En nuestro trabajo realizamos un dispositivo que ayuda a los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de energía solar a aumentar el rendimiento del sistema (Meidel y Meidel, 2003).

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Tipos de panel solar

Existen en la actualidad diferentes tipos de celdas y paneles solares las cuales se destacan:

#### 2.1.1 Celdas de silicio Monocristalino

Las células generalmente son de azul uniforme, se obtienen al cortar el silicio fundido solidificado después de este haberse enfriado, presentan un rendimiento del 14% al 16.5% (McQuerry, 2008).

#### 2.1.2 Celdas de silicio multicristalino

Las células de silicio multicristalino tienen aspecto azulado, en las cuales se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales, tienen

una eficiencia menor que las células monocristalinas pero su producción es menos costosa, a estas aún les baja aún más el rendimiento en condiciones de iluminación baja (Aden, 2007).

## 2.2 características eléctricas de un panel solar

En las características tensión vs. corriente y de tensión vs. potencia eléctrica se pueden observar el comportamiento del panel solar de acuerdo a la irradiación recibida, y se puede representar su modelo matemático teniendo en cuenta el siguiente circuito el cual se muestra en la figura 1 (Orduña, 2001).

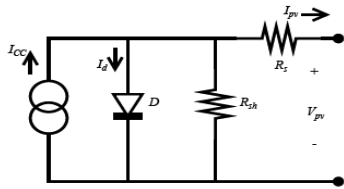


Fig. 1. Modelo matemático de una celda solar.  
(Rico, 2013).

La ecuación característica de una celda solar se muestra en (1).

$$I_{pv} = I_{cc} - I_0 \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Dónde:

$k$  es la constante de Boltzman.

$T$  es la temperatura absoluta.

$I_0$  es la corriente de saturación inversa del diodo.

$q$  es la carga del electrón.

$n$  factor de idealidad del diodo.

Para obtener un voltaje y corriente apropiados para diferentes aplicaciones se interconectan varias celdas solares en serie-paralelo para formar un módulo fotovoltaico, a su vez estos pueden interconectarse entre sí para formar lo que se conoce como un arreglo fotovoltaico (Nelson, 2003).

Las curvas que representan el comportamiento de estas ecuaciones son:

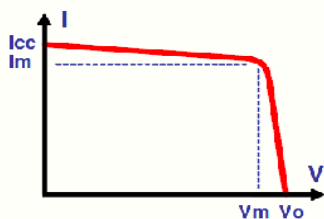


Fig. 2. Curva Tensión – Corriente (Nelson, 2003).

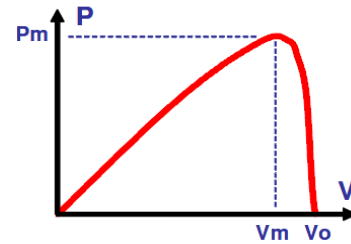


Fig. 3. Curva Tensión – Potencia (Canchila, 2010)

## 3. SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Existen sistemas que tienen la posibilidad de realizar un seguimiento del movimiento del sol el cual favorecen o aumentan la absorción de energía o radiación solar, permitiendo que se aproveche mejor este recurso natural (Rashid, 2007).

### 3.1 Seguimiento solar de soporte estático

Colocación sobre soporte estático sin movimiento. Dependiendo de la latitud de la instalación y de la aplicación que se quiera dar se dotan a los paneles de la inclinación más adecuada para captar la mayor radiación solar posible. Es el sistema más habitual que se encuentra en las instalaciones (De Vos, 1981).

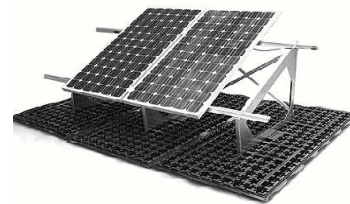


Fig. 4. Soporte estático (De Vos, 1981).

### 3.2 Seguimiento solar de un eje

Estos soportes realizan un cierto seguimiento solar. La rotación del soporte se hace por medio de un solo eje, ya 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 azimut del Sol, pero no ambas a la vez (Andrew, 2002).



Fig. 5. Soporte un eje (Andrew, 2002).

### 3.2 Seguimiento solar de dos ejes

Con este sistema es posible realizar un seguimiento total del sol en altitud y en azimut y siempre se conseguirá que la radiación solar incida perpendicularmente obteniéndose la mayor captación posible. Existen tres sistemas básicos de regulación del seguimiento del sol por dos ejes (Andrew, 2002).



Fig. 6. Soporte dos ejes (Rico, 2013)

## 4. DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA

La estructura robótica desarrollada para el seguimiento consta de tres grados de libertad. Esta estructura que soporta las celdas solares es movida por medio de servomotores controlados por PWM variable. Posee dos servomotores que se encargan de mover la estructura en los ejes X y Y. posee un tercer motor que se encarga del descenso de las celdas para aumentar la diferencia de voltajes, este descenso de las celdas es de treinta grados, esto se hace para tener datos más claros al realizar el seguimiento de la máxima intensidad lumínica, una vez el panel central este recibiendo una mayor radiación que los otros cuatro paneles, estos se ubican de forma paralela al panel central y así de esta manera lograr que todos los paneles puedan recibir la mayor radiación posible (Beleño, 2011).

La estructura de 50 cm de altura y 42 cm de ancho, realizada con acrílico en su mayor proporción, es el soporte de las celdas solares. La estructura final se presenta en la siguiente figura:



Fig. 7. Foto del primer prototipo

### 4.1 Los servomotores

Se utilizaron servomotores de la marca *Hobbico CS-60 Servo Standard Sport*, como se puede apreciar en la figura.



Fig. 8. Servomotor

Las principales características de los servomotores (*Hobbico CS-60 Servo Standard Sport*) se muestran a continuación:

- Voltaje de alimentación: 4.8V - 6V.
- Velocidad: 4.8V (0.19 sec/60°), 6V (0.15 sec/60°).
- Torque: 3.57 kg-cm.
- Peso: 44.9 g.
- Longitud: 41 mm.
- Ancho: 20 mm.
- Altura: 36 mm.

## 5. TARJETA CONTROLADORA

El sistema encargado del control de los motores consta de las siguientes partes:

### 5.1 Sensado de la radiación solar

Para el sensado se utilizaron celdas solares, estas celdas se conectan directamente al convertidor análogo digital del microcontrolador, ya que generan un máximo de 4.7 voltios, los cuales no son perjudiciales para el microcontrolador. Es necesario colocar resistencias de protección de corriente entre los sensores y el puerto, estas resistencias tienen valores de 10 Kilo ohmios. El circuito de esta etapa se muestra a continuación:

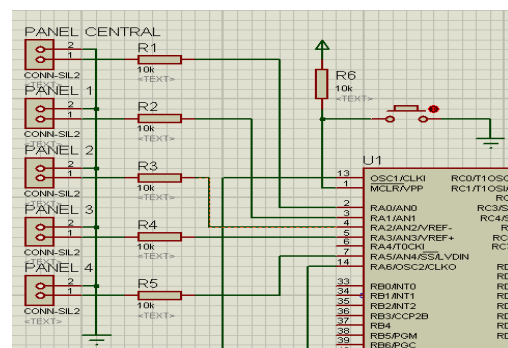


Fig. 9. Entradas de los sensores

Las celdas utilizadas como sensor tienen las siguientes características:

Las celdas que se utilizaron en este trabajo poseen las siguientes características eléctricas:

- Máxima potencia ( $P_m$ ) = 0.75 W.
- Máximo voltaje de trabajo óptimo ( $V_m$ ) = 4.7V.
- Máxima corriente activa óptima ( $I_m$ ) = 160 mA.
- Voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) = 5V.
- Corriente de corto circuito ( $I_{CC}$ ) = 180mA.

En la siguiente grafica se observa la conexión de los servos y el sensado del ángulo con el microcontrolador.

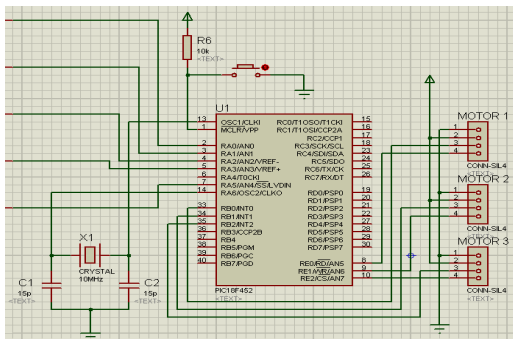


Fig. 10. Esquema del microcontrolador.

## 5.2 Medición de los ángulos de posicionamiento

Para la medición del ángulo de los servomotores se utilizó el potenciómetro interno que estos contienen, ya que leyendo el voltaje en el pin central de estos se puede conocer la posición en la que se encuentra el servomotor.

Se plantearon las siguientes ecuaciones para el cálculo de los ángulos:

Motor1 (motor de movimiento en el eje X):

$$\text{Voltaje}(1 \text{ grado}) = \frac{1.97 - 0.52}{180 - 0} = 0.00805 \text{ V}$$

Motor2 (Motor de movimiento en el eje Y):

$$\text{Voltaje}(1 \text{ grado}) = \frac{2.01 - 0.55}{180 - 0} = 0.00811 \text{ V}$$

Motor3 (Motor de ubicación de los paneles laterales respecto al panel central):

$$\text{Voltaje}(1 \text{ grado}) = \frac{1.99 - 0.54}{180 - 0} = 0.00805 \text{ V}$$

Sabiendo la variación de voltaje por cada ángulo, podemos calcular la posición en la que se encuentran cada uno de los servomotores con las siguientes fórmulas:

Motor1 (motor de movimiento en el eje X):

$$\text{Ángulo } X = \frac{\text{Voltaje}(\text{potenciómetro}) - 0.52}{0.00805 \text{ V}}$$

Motor2 (Motor de movimiento en el eje Y):

$$\text{Ángulo } Y = \frac{\text{Voltaje}(\text{potenciómetro}) - 0.55}{0.00811 \text{ V}}$$

Motor3. Motor de ubicación de los paneles laterales respecto al panel central.

$$\text{Ángulo } Z = \frac{\text{Voltaje}(\text{potenciómetro}) - 0.54}{0.00805 \text{ V}}$$

Cabe resaltar que todas estas variables son analógicas por lo que se utilizaron los canales analógicos digital del microcontrolador

## 6. COMUNICACIÓN ETHERNET

Una de las novedades de este sistema es la característica de supervisión y control se pueden realizar por Ethernet, es decir, que la podemos comunicar desde cualquier punto o a través del Internet.

### 6.1 Tarjeta de comunicación Ethernet

Para la comunicación Ethernet se utilizó el controlador producido por la empresa microchip el ENC28J60 el cual es el encargado de convertir los niveles y protocolos de Ethernet a serial para que esta pueda comunicarse con el microcontrolador. Una imagen del dispositivo se ve a continuación.

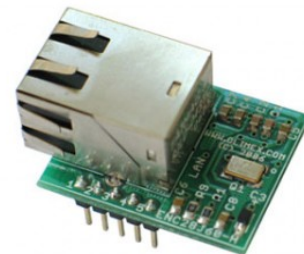


Fig. 11. Tarjeta del controlador ENC28J60.

El esquema conceptual de la tarjeta de comunicación se ve a continuación:

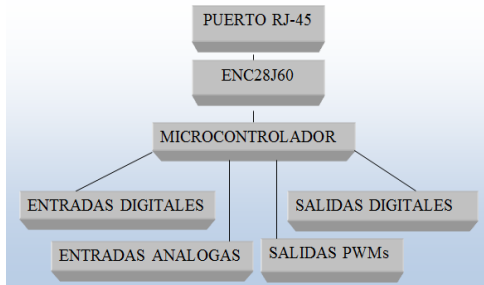


Fig. 12. Mapa de la tarjeta de comunicación.

## 6.2 Circuito de la tarjeta controladora

Para el diseño de la tarjeta electrónica se tuvo en cuenta todos los parámetros de diseño de compatibilidad electromagnética y electrónica de los dispositivos utilizados a si como las reglas necesarias para el diseño del PCB, el cual se realizó con Ares de Proteus.

El diseño final se muestra a continuación:

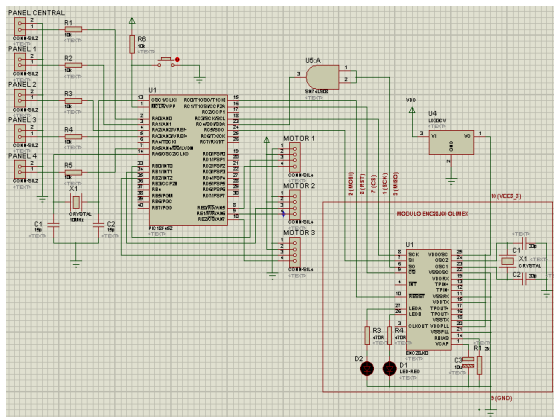


Fig. 13. Tarjeta de comunicación y control.

## 7. SOFTWARE PARA EL MONITOREO Y CONTROL

El software utilizado para el monitoreo y control fue desarrollado en LabView 2011. Esta versión nos permite realizar comunicación Ethernet con una tarjeta. A su vez esta tarjeta también se encarga de controlar la estructura robótica de seguimiento solar, el cual está programado con algoritmo de MPP (*Máximo Punto de Potencia*).

A continuación se presentan los subprogramas VIs utilizados para crear la estructura en tres dimensiones:

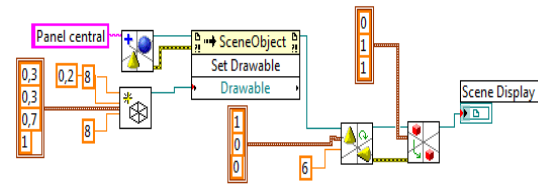


Fig. 14. Diagrama de bloques para la creación de un panel en 3D.

En la figura, se observa en el panel frontal en 3D.

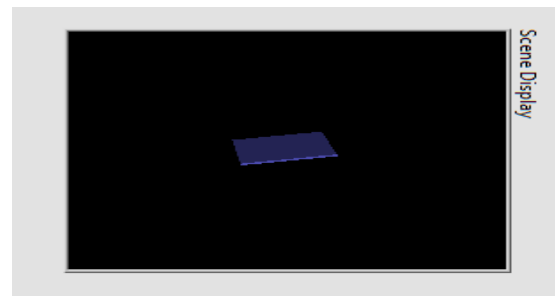


Fig. 15. Panel creado en 3D.

Para la creación de los objetos restantes que conforman la estructura se utilizaron también cilindros, cajas, esferas. Dependiendo el tipo de objeto se le configuraba el tamaño o el radio, color entre otros. También se configuraron las coordenadas X, Y, Z de cada uno de ellos.

A continuación una imagen de la estructura en 3D:

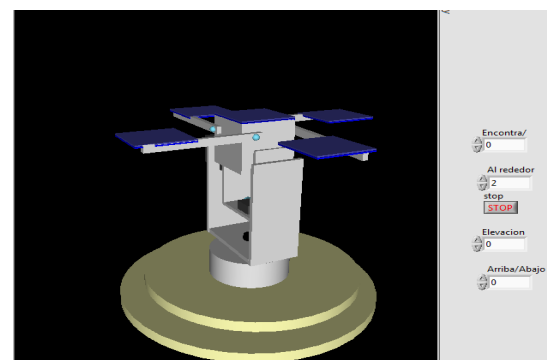


Fig. 16. Tarjeta de comunicación.

## 8. RESULTADOS

Como resultado se obtuvo una estructura que se puede controlar y monitorear a través de Internet o de una red LAN.

Los esquemas de conexión, como la tarjeta controladora física se muestran a continuación.



La tarjeta controladora.

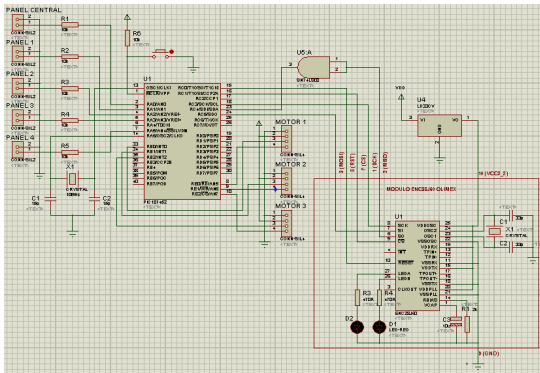


Fig. 17. Tarjeta de comunicación y control.

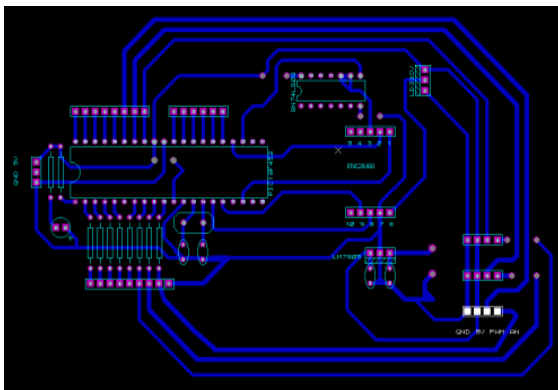


Fig. 18. PCB de la tarjeta controladora

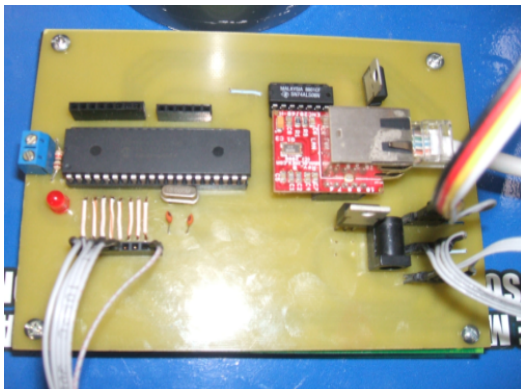


Fig. 19. Vista superior de la tarjeta de comunicación y control.

Los resultados de las mediciones y pruebas realizadas durante su puesta en funcionamiento.

El diagrama de en bloques del programa implementado en el microcontrolador para el control de los motores de acuerdo a la potencia calculada con el método de P&O para el cálculo del MPP.

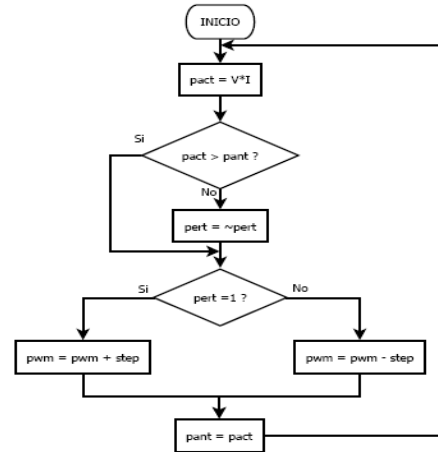


Fig. 20. Diagrama en bloques del algoritmo de P&O.

El diagrama en bloques del programa enlazando la comunicación y el control de la estructura se ve a continuación:

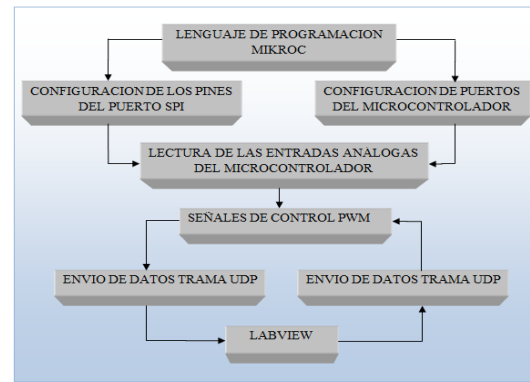


Fig. 21. Mapa conceptual diseño del Algoritmo.

También mostramos una tabla donde se obtuvo el tiempo en milisegundos de las señales PWM para que cada uno de los servomotores se posiciones en 0 y 180 grados.

Tabla 1. Duración en milisegundo de los semiciclos de las señales PWM.

Grados	PWM (Motor 1)		PWM (Motor 2)		PWM (Motor 3)	
	Alto (ms)	Bajo (ms)	Alto (ms)	Bajo (ms)	Alto (ms)	Bajo (ms)
0	0.68	9.60	0.70	9.60	0.70	9.60
180	2.38	7.90	2.48	7.82	2.42	9.88

En la figura, se muestran las señales PWM enviadas a los motores de movimiento en el eje X y Y, en 0 y 110 grados respectivamente. El tiempo en alto de la señal PWM define el ángulo, mientras

que el tiempo en bajo influye en la rapidez con la que el servomotor se posicionara en dicho ángulo.

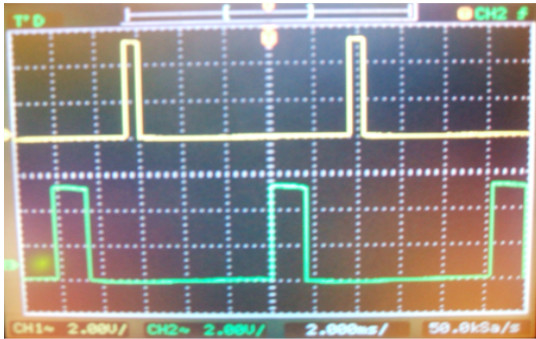


Fig. 22. Señales PWM enviadas a los servomotores.

En la parte del software que monitorea y controla la estructura remotamente mostramos los siguientes resultados:

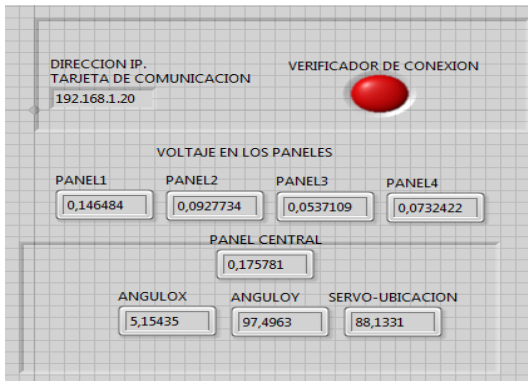


Fig. 23. Panel de comunicación.

En la siguiente grafica se muestra una imagen completa del software desarrollado en LabView 2011. Esta interfaz monitorea y controla la estructura a su vez que se puede ver la simulación del movimiento de la estructura tal como sucede en tiempo real.



Fig. 24. Tarjeta de comunicación

## 9. CONCLUSIONES

La estructura tiene la capacidad de realizar un seguimiento automático de la máxima energía solar irradiada, consiguiendo con esto mejorar el rendimiento energético del sistema fotovoltaico. También se puede ubicar la estructura a nuestro antojo por medio de la interfaz gráfica implementada en LabVIEW.

La supervisión y control de datos fue posible mediante la implementación del hardware de la tarjeta SPI-Ethernet, además del desarrollo de software mediante código fuente para aplicaciones embebidas. Así de esta manera se desarrolló un sistema modular y flexible que integró todos los bloques necesarios para una conexión Ethernet completa con conectividad a la interfaz LabVIEW.

El desarrollo de este proyecto nos permitió aprender conceptos muy importantes en cuanto a las fuentes de energías renovables, y los beneficios ambientales.

La comunicación Ethernet entre el PIC y el programa de control de LabVIEW nos brindó gran escalabilidad en el proyecto en general, y eliminar las limitaciones de las distancias, ya que el computador donde se controla la garita puede estar muy lejos o muy cerca del sistema electrónico.

## RECONOCIMIENTO

Este trabajo se desarrolló con la colaboración de la Universidad de Pamplona a través de la Maestría en Controles Industriales y el Grupo de Investigación en Automatización y Control, el PhD. Aldo Pardo García y el PhD. Ivaldo Torres Chávez.

## REFERENCIAS

- Andrew, S. (2002). Redes de Computadoras. Tercera Edición, Editorial Camile Trentacoste.
- Beleño, K., *et al.* (2011). Sistema de posicionamiento Solar Utilizando la Plataforma de Labview y el Microcontrolador PIC18F4550. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzadas, No. 18, Vol. 2.
- Canchila, A. (2010). Diseño e implementación de un sistema de posicionamiento de una estructura para medir la máxima intensidad del

- brillo solar utilizando el software de LabVIEW, Pamplona – Colombia.
- De Vos, H. and Pauwels, A. (1981). On the thermodynamics limit of photovoltaic energy conversion. *Applied Physics*, pp. 119-125.
- Leal, F. (2013). Estudio del Potencial Eólico y Solar en Cúcuta. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzadas*, No. 22, Vol. 2.
- McQuerry, S. (2008). *Interconnecting Cisco Network Devices, Part 1 (ICND 1)*. Segunda Edición, Editorial CISCO.
- Meinel, A. B. y Meinel, M. P. (2003). *Aplicaciones de las energías solares*. Editorial Reverte, S.A.
- Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, London.
- Orduña, J. (2001). *Arquitectura y Programación de Microcontroladores*. Colección Ingeniería Informática. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rashid, M. H. and Lana Char. (2007). “Solar Power Conversion” *Power Electronics Handbook*, Capítulo 26, pp. 661 – 672, Academic Press, Segunda Edición.
- Reynders, D. (2003). *TCP/IP and Ethernet Networking*. Segunda Edición, Editorial Elsevier.
- Rico, E. (2013). Robot Móvil Solar. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzadas*, No. 21, Vol. 1.
- U.S. Department of Energy. (2002). *The history of solar*.