

Control difuso de un seguidor solar

Dr. Rafael Villela Varela, M. en I. Claudia Reyes Rivas, Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo, M. en I. Aurelio Beltrán Telles, Ing. Daniel Alejandro Martínez Castro y M en C. Alejandro Chacón Ruiz.

Resumen—En este artículo se diseñó un Seguidor solar de eje polar controlado mediante lógica difusa, para aumentaren 30 % la eficiencia de la generación de energía eléctrica en un panel fotovoltaico con respecto a un sistema de panel fijo. Se logró seguir la trayectoria del sol durante el día para lograr la mayor cantidad posible de radiación solar incidiendo sobre la superficie del panel. El viento es un factor importante a considerar, y se diseñó una estructura que minimiza los movimientos causados por la acción de corrientes de aire, manteniendo un perfil bajo en su altura y obteniendo una estabilidad aceptable. El control fue diseñado utilizando Fuzzy Logic Controller Design, que es una herramienta de la plataforma LabView, y como puerto de comunicación se usó el módulo NI ELVIS.

Palabras Claves— Energía fotovoltaica, seguidor solar, control difuso, LabView.

Introducción

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye frente a los combustibles fósiles, una fuente inagotable, contribuye al autoabastecimiento energético, y es menos perjudicial para el medio ambiente, evitando los efectos de su uso (contaminación atmosférica, residuos, etc.). La generación eléctrica a partir de la radiación solar tiene nulos o mínimos efectos ambientales. No se producen emisiones de CO₂, ni afección al terreno, agua, flora o fauna. Se trata de un sistema completamente silencioso, Además en gran parte de los casos, se puede integrar en los tejados de las viviendas como un elemento constructivo más. La energía solar fotovoltaica representa la mejor solución para aquellos lugares a los que se quiere dotar de energía eléctrica preservando las condiciones del entorno, como es el caso de los espacios naturales protegidos.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar en energía eléctrica, acondicionando está a los requerimientos de una aplicación determinada. Consta de los siguientes elementos:

- Conjunto de módulos o paneles de celdas solares.
- Cimientos para sostener la base y la estructura para soportar los paneles.
- Regulador o controlador de carga de la batería.
- Inversor de corriente directa (C.D.) a corriente alterna (C.A.).
- Baterías para almacenamiento de carga eléctrica.

En un sistema típico (Figura 1), el proceso de funcionamiento es el siguiente: la luz solar incide sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde es transformada en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares; esta energía es recogida y conducida hasta un controlador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías, en la que es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de carga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas. La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas por alimentar son de corriente directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; en cambio, si las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna[1].

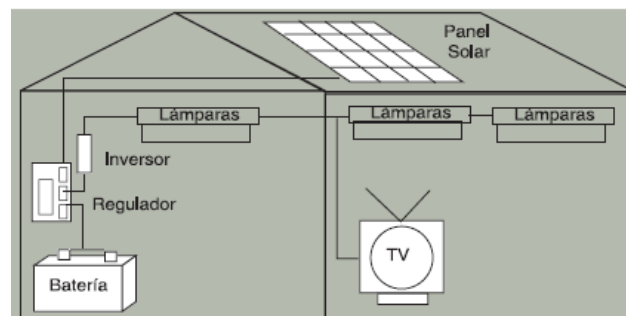


Fig. 1. Esquema simple de un sistema fotovoltaico.

La potencia nominal de los módulos solares (Figura 2) normalmente está entre 50 y 200 Wp (Watts pico), aunque hoy en día algunos fabricantes los ofrecen arriba de 200 Wp. El material más comúnmente usado en la fabricación es el silicio; la eficiencia típica de estos, en condiciones estándar de irradiación y temperatura ($1,000 \text{ watts/m}^2$ y 25°C) se encuentra entre 12 y 15% para silicio monocristalino, entre 11 y 14 %, para silicio policristalino; y entre 5 y 7 % para los de silicio amorfo[2]. Es muy baja la eficiencia de las celdas fotovoltaicas, por lo que se han buscado alternativas que pueden aumentarla. Una de esas alternativas es el uso de seguidores solares para que los paneles sigan la trayectoria diaria del sol, de tal manera que siempre los rayos solares sean perpendiculares a la superficie de las fotoceldas y se aproveche al máximo la radiación solar, aumentando la potencia eléctrica generada.

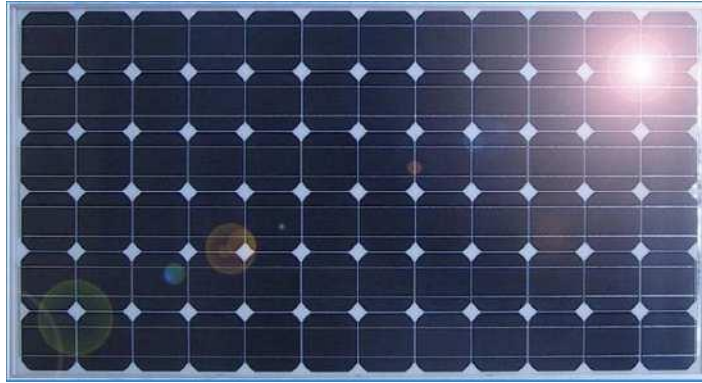


Fig. 2. Módulo fotovoltaico típico.

El uso de seguidores solares ha reportado ganancias superiores al 20% en estudios de campo. El seguidor solar sigue la trayectoria aparente del Sol ocasionada por los movimientos de rotación y traslación de la Tierra respecto al Sol[3].

Los seguidores solares activos utilizan un control electrónico para ubicar la posición del Sol, este control se retroalimenta a base de sensores o por cálculos numéricos y utilizan algún actuador para realizar el movimiento del seguidor. En el mercado existen diferentes tipos de seguidores activos que se diferencian entre sí por el número de movimientos automáticos que realizan y el volumen de trabajo que pueden desarrollar.

El seguidor solar de un eje polar gira sobre un eje orientado en dirección norte-sur y con una inclinación del eje igual a la latitud del lugar, los módulos se colocan paralelos al eje de giro, la velocidad de giro es de aproximadamente 15° por hora (Figura 3).

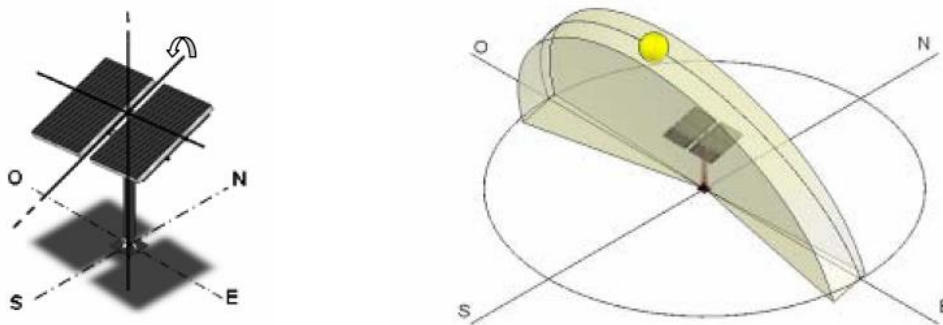


Fig. 3. Seguidor solar de un eje polar [3]

La potencia y orientación de la radiación solar varía según el día del año, la hora, las condiciones atmosféricas y la latitud del lugar de la ubicación del panel fotovoltaico. Debido a los cambios en la orientación respecto al sol, la energía eléctrica obtenida por paneles situados sobre seguidores solares monoaxiales es un 30% superior a la obtenida por paneles fijos en un año, como se puede apreciar en la Tabla I.

Tabla I. Ganancia obtenida con seguidores solares de un eje frente a paneles fijos. [4]

	Panel fijo (kWh/día.m2)	Seguidor (kWh/día.m2)	Ganancia (%)
Enero	3,2	3,9	22
Febrero	3,7	4,5	22
Marzo	4,6	5,8	26
Abril	5,6	7,3	30
Mayo	5,8	8,1	40
Junio	5,7	8,3	46
Julio	5,7	8,1	42
Agosto	5,3	7	32
Septiembre	5,3	7	32
Octubre	4,3	5,4	26
Noviembre	3,3	4,1	24
Diciembre	2,9	3,58	23
Total Año	4,61	6,2	34

En los seguidores es usual que el soporte y el movimiento de la placa se realicen con una columna única como se observa en la Figura 4. Si se tiene una placa colectora grande se producen intensos momentos mecánicos en el punto de giro causando un desgaste intenso. Además al necesitar soportar grandes momentos de inercia la columna necesaria tiene grandes dimensiones y no es factible la instalación de estos seguidores sobre cubiertas.



Figura 4. Seguidor solar con columna única [5].

A. Control Difuso.

La inteligencia artificial tiene varias ramas entre las que se encuentra la lógica difusa (fuzzy logic), que es otro de los algoritmos que se han ido consolidando como una herramienta útil para tratar sistemas que son estructuralmente difíciles de modelar debido a su naturaleza no lineal. La lógica difusa tiene una gran gama de aplicaciones, especialmente en áreas relacionadas con control, el procesamiento de imágenes, la robótica y la electrónica de consumo, incorporándose en un gran número de productos y procesos.

La lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta. En general la lógica difusa imita el razonamiento humano para la toma de decisiones basada en información con las características mencionadas, al contrario de la lógica convencional, que trabaja con información bien definida y precisa.

En un sistema difuso, un pequeño cambio en la variable de entrada, da como resultado un cambio más natural en el funcionamiento del sistema. El PID es un controlador lineal, esto es, las ecuaciones del PID asumen valores lineales, sin embargo cuando la dinámica del proceso no es lineal, hay que tener especial cuidado para compensar la no linealidad del sistema, y el controlador PID por sí mismo no es suficiente para lograr esta compensación. Este cuidado especial no puede

ser siempre explícito ni describirse en forma de ecuaciones, pero es frecuente tener un operador humano que lo controle de modo empírico, como se dice la regla del dedazo. La esencia del control difuso es explotada en este tipo de hechos conocidos. Los sistemas de control difuso usan las mismas entradas que un PID (por ejemplo el error y su derivada), pero procesan la no linealidad del sistema. De aquí que el controlador difuso puede ser usado como un controlador PID no lineal.

La lógica difusa trabaja con conjuntos difusos (funciones miembro), estos conjuntos están definidos por sus funciones de pertenencia la cual expresa la distribución de verdad de una variable. Un conjunto difuso se puede definir matemáticamente al designar a cada posible individuo que existe en el universo del discurso, un valor que representa su grado de pertenencia o membresía en el conjunto difuso. La diferencia entre un conjunto clásico y uno difuso para analizar la estatura de personas, se ilustra en la Figura 5.

La lógica difusa es considerada como una técnica para fabricar decisiones. En muchas aplicaciones de control de procesos, el algoritmo resultante esta gobernado por un número de decisiones claves que están implícitas en el mismo. Cuando la experiencia o comprensión del problema no es buena o no se tiene, optimizar el algoritmo es muy difícil. Esta es la razón por la cual la lógica difusa es utilizada. Con lógica difusa, podemos dividir el problema dentro de un número discreto de posibles decisiones para asociar las funciones de membresía con cada entrada y salida. La exactitud de la salida depende de cómo sean definidas las funciones de memorice y de qué reglas sean implementadas [6].

En este proyecto se usará control difuso para girar el motor en directa o reversa para que el panel fotovoltaico se ubique en la posición donde reciba la mayor radiación solar. Las fotorresistencias indicarán donde existe el nivel más alto de insolación y el control difuso determinará la posición más adecuada del panel y el motor moverá la estructura hacia esa posición.

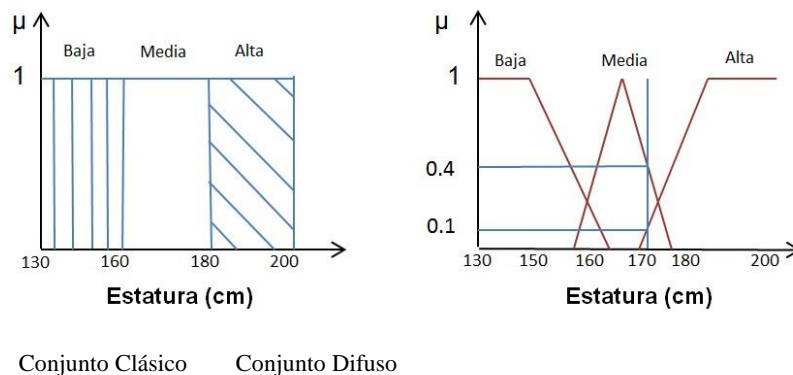


Figura 5. Comparación de un conjunto clásico y uno difuso.

B. Plataforma LabVIEW y Módulo ELVIS.

En este proyecto se empleó el software LabVIEW que constituye un sistema de programación gráfico para aplicaciones que involucran adquisición, control, análisis y presentación de datos. LabVIEW es un lenguaje de programación de alto nivel, de tipo gráfico, y enfocado al uso en instrumentación [7].

El módulo "Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite" de National Instruments, denominado NI ELVIS (Figura 6), es un entorno de diseño y creación de prototipos basado en LabVIEW para laboratorios de ingeniería y ciencias en general. NI ELVIS combina instrumentos virtuales basados en LabVIEW, un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) multifunción, una tarjeta de prototipos y una estación de trabajo especialmente diseñados para formar el conjunto de herramientas que se utiliza en todos los laboratorios universitarios. Al estar basado en LabVIEW y contener capacidades completas de adquisición de datos y creación de prototipos, este sistema es perfecto para un curso académico, que puede variar desde clases de nivel básico hasta la realización de un proyecto de fin de carrera [8]. La tarea fundamental de un sistema de adquisición de datos es coleccionar, medir o generar señales provenientes del mundo real y mandarlos a una computadora para procesarlos. El módulo NI ELVIS incorpora el hardware DAQ (Data Acquisition System) y el software LabVIEW como dispositivos de adquisición de datos.

Los dispositivos DAQ adquieren las señales eléctricas provenientes de un transductor o un sensor que convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica, además pueden producir simultáneamente señales eléctricas. Estas señales pueden controlar los sistemas físicos. La mayoría de los dispositivos DAQ tienen entradas y salidas analógicas, entradas y

salidas digitales, contadores y temporizadores. Todos estos se encuentran en la tabla para prototipos que ésta localizada en la parte superior del NI ELVIS, dicha tabla permite realizar las conexiones a los puertos de una forma simple[9].



Figura 6. Módulo NI ELVIS

II. DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR

A. Selección del tipo de seguidor

En base a investigaciones previas se determinó que al usar un seguidor solar aumenta la eficiencia de generación de energía respecto a paneles fotovoltaicos fijos, y además se determinó usar un solo eje con movimiento polar ya que ofrece un mejor rendimiento a lo largo del año. No se justifica el uso de un seguidor solar de dos ejes debido a que la adición de un segundo eje de movimiento reportaría un incremento muy reducido en la eficiencia, y en algunas épocas del año su rendimiento es similar al seguidor polar monoaxial.

El seguidor solar está diseñado para recorrer 150° libremente a lo largo del día. El Sol se mueve 15° cada hora aproximadamente en el plano que contiene su trayectoria, por lo que el seguidor solar deberá moverse también 15° por hora, por lo que en total durante su periodo de trabajo se debe mover 120° como se ve en la Figura 7.

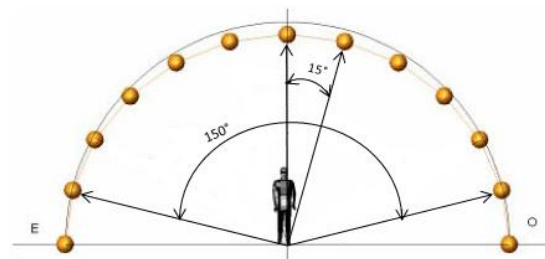


Figura 7. Acotación del ángulo de seguimiento [4].

B. Diseño de la estructura

En el diseño de la estructura se consideraron dos factores: la cantidad de módulos que debía soportar y el tipo de actuador para el movimiento. La estructura se diseñó para soportar satisfactoriamente el módulo fotovoltaico utilizado que mide 60 centímetros de ancho por 90 de largo.

La selección del actuador se basó en el cumplimiento de las siguientes características:

- Funcionamiento con la energía disponible generada por el mismo sistema fotovoltaico: 12 volts de corriente directa (Vcd).
- Capacidad para mantener su última posición sin uso de energía.
- Capacidad de proporcionar movimientos pequeños sin la incorporación de más elementos mecánicos.
- Adecuado para el trabajo a la intemperie.

Para el movimiento del seguidor solar se optó por utilizar un motor elevador de ventanas de automóvil, ya que este tipo de motor no ocupa tanto espacio y tiene un mecanismo integrado que lo hace bastante fuerte, además es barato en comparación con otros motores y el voltaje de alimentación es de 12 Vcd y se puede obtener de la batería del sistema. Estos motores tienen una característica muy importante que consiste en que mantienen una posición mientras no reciban voltaje lo que los hace ideales para mover la estructura del seguidor solar, ya que en caso de que los motores se apaguen conservarán su posición hasta que se les indique un nuevo desplazamiento aplicándoles voltaje. La potencia consumida por este motor es de 24 Watts (W) con una corriente de 2.6 Amperes (A). Se realizó un diseño sencillo con materiales de fácil adquisición como barras de acero, chumaceras, discos dentados (obtenidos de pequeñas transmisiones de automóviles) y tubos de acero.

La estructura mecánica está formada por varias partes y fue necesario soldar gran parte de ellas para proporcionar rigidez y soporte al sistema. En la Figura 8 se observa la estructura completa y sus partes principales son:

1. Base de la estructura.
2. Base de los circuitos de control.
3. Discos dentados.
4. Barras de soporte del panel.
5. Motor de accionamiento.
6. Chumaceras para inclinación de latitud.
7. Chumaceras para eje polar.
8. Base de soporte para marco de panel.
9. Barra para modificar la latitud.



Figura 8. Partes de la estructura del seguidor solar

El panel montado en la estructura del seguidor se muestra en la Figura 9 junto con las dimensiones del marco.



Figura 9. Dimensiones del marco para el panel solar.

C. Circuitería

Se diseñaron los circuitos eléctricos para las etapas de potencia y acondicionamiento de señales de entrada. Se utilizó el programa de simulación *Live Wire* para corroborar su correcto funcionamiento.

1) C.1. Acondicionamiento de señales de entrada entregadas por los fotosensores

El módulo NI-ELVIS solo soporta voltajes menores a 3.3 Volts en todos sus puertos, por lo que es necesaria una etapa en donde la señal que sea entregada por los fotosensores sea acotada y acondicionada para que entregue una señal con un rango entre 0 y 3.3V. Para elegir el tipo de fotosensor que se utilizó en el sistema se realizaron algunas sencillas pruebas, en las cuales se comprobó su rango de acción y su sensibilidad. En estas pruebas se utilizaron 2 tipos de sensores fotovoltaicos diferentes: fototransistores (PT1302B/C2) y fotorresistencias (LDR). Debido a su sensibilidad y rendimiento, se eligió trabajar con los LDR. Otra razón para trabajar con fotorresistencias es que son fáciles de conseguir en tiendas de electrónica. Las fotorresistencias varían su valor óhmico de acuerdo al nivel de luz incidente y se fabrican con materiales de estructura cristalina como sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio [10].

Después se procedió a diseñar 2 circuitos idénticos (Figura 10), uno para cada LDR, y así obtener las señales analógicas de entrada. Los componentes para el diseño de cada circuito fueron: una fotorresistencia, un diodo Zener de 3.3 V, y una resistencia de 5.6 K Ω .

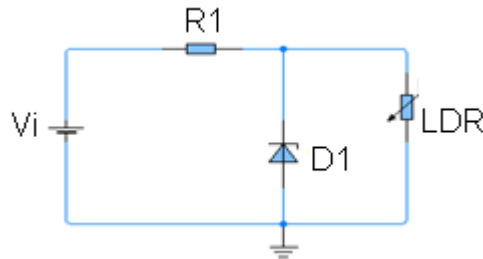


Figura 10. Circuito de sensado de luz.

Entre la resistencia R_1 y el LDR se crea un divisor de voltaje cuyo valor dependerá directamente de la resistencia actual del LDR.

$$V_s = \frac{R_{LDR}}{R_{LDR} + R_1} V_i \quad (1)$$

Usando (1) para un voltaje de entrada $V_i = 5V$, una resistencia $R_1 = 5.6K\Omega$, y una resistencia mínima entregada por el fotorresistor en un medio ambiente muy iluminado $R_{LDR} = 220\Omega$, entonces la salida del divisor de voltaje será:

$$V_s = \frac{220\Omega}{220\Omega + 5.6K\Omega} 5 = 0.18V$$

Mientras que en un medio con muy poca luz $R_{LDR} = 9K\Omega$ y se tiene que:

$$V_s = \frac{9\Omega}{9\Omega + 5.6K\Omega} 5 = 3.08V$$

B. C.2. Puente H

El puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avanzar y retroceder [11]. El puente H mostrado en la Figura 11 funciona de manera simple, puede manejar un motor de 6 a 40 Voltios. Tiene dos entradas lógicas A y B, y dos salidas denominadas también A y B. Si la entrada A es alta, entonces la salida A también será alta y el motor gira en un sentido. Ahora, si la entrada B es alta, la salida B es alta y el motor gira en sentido contrario. Si las dos entradas son bajas, el motor estará apagado y no existe consumo de potencia alguno. Por el contrario, si las dos entradas son altas, el motor entra en corto pero no sufre daño alguno ya que esto se hace para producir un efecto de frenado del motor; esto solo se hace por un corto tiempo. Este comportamiento se resume en la Tabla II.

Se usa un control de velocidad por PWM (Pulse Width Modulation). Solo se tiene que aplicar la señal PWM a una de las entradas de control del puente. Este puente generalmente trabaja bien para bajas frecuencias de señales que no son PWM.

Tabla II. Tabla de salidas y entradas del puente H.

Entrada		Salida	
A	B	A	B
0	0	Libre	
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	1	1

El circuito usa transistores Darlington de potencia para alimentar al motor, unos transistores de bajo costo como los 2N2222 para manejar los Darlington y unas cuantas resistencias. En la Figura 11 se muestra el diagrama esquemático y el modelo construido en la Figura 12.

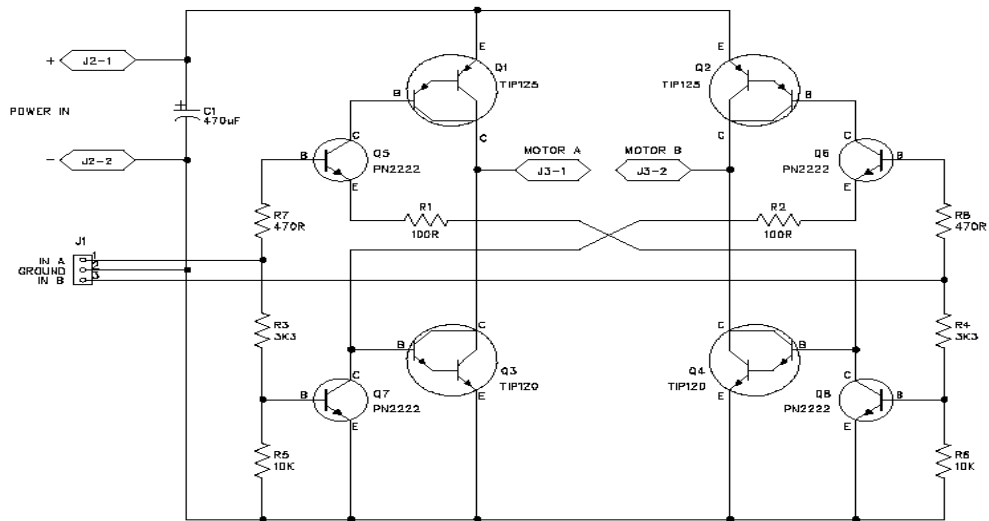


Figura 11. Diagrama esquemático del Puente H.



Figura 12. Circuito impreso del Puente H.

C.3. Diseño del controlador con LabView

En esta sección se describe la programación en LabView para el controlador difuso y la interfaz diseñada para el monitoreo de las variables a controlar.

C.3.1 Funciones miembro

El primer paso para el diseño del control fue la transformación del dominio para que los valores entregados por los sensores sean transformados a entradas fuzzy. Por cada entrada se requiere tener un número adecuado de etiquetas que describan su comportamiento adecuadamente. Se utilizó la herramienta *Fuzzy Logic Controller Design Project Manager* de LabView para realizar las funciones miembro y capturar las reglas de evaluación.

Las funciones miembro para el seguidor solar se muestran en la figura 13 para el sensor izquierdo y en la figura 14 para el sensor derecho. En ambas, se pueden apreciar seis funciones miembro con dominios similares, a excepción de la última (en verde) que tiene un dominio mucho mayor que las demás. Esto se debe a que para el dominio de 1 a 3 [V] el actuador del seguidor (motor) debe permanecer inactivo, por lo tanto, es suficiente con una sola función miembro para cubrir todo este rango de valores. Es importante aclarar que los sensores entregarán voltajes cercanos a 3 [V] para ambientes con poca luz (noche) y cercanos a 0 [V] para ambientes con mucha luz (día). La resistencia entregada por las fotorresistencias colocadas en el seguidor solar ha sido acondicionada para entregar una señal con una amplitud mínima de 0 [V] y una amplitud máxima de 3.3 [V]. Esto se logró por medio del circuito de la Figura 10.

Las etiquetas para cada función miembro de entrada son:

- optizq** (óptimo izquierdo), con un dominio de -1 a -0.6.
- optizq+** (óptimo izquierdo +), con un dominio de -0.8 a -0.3.
- optizq++** (óptimo izquierdo ++), con un dominio de -0.5 a 0.2.
- movizq** (movimiento izquierdo), con un dominio de 0.1 a 0.5.
- movizq+** (movimiento izquierdo+), con un dominio de 0.4 a 0.8.
- movizq++** (movimiento izquierdo++), con un dominio de 0.7 a 1.2.
- estizq** (estático izquierdo), con un dominio de 1 a 3.

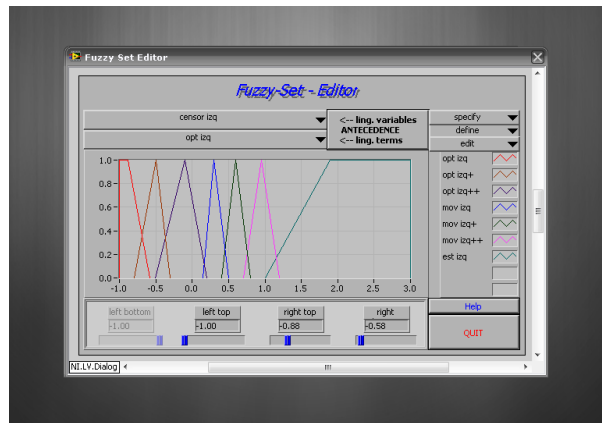


Figura 13. Universo del discurso para señal de entrada “sensor izquierdo”.

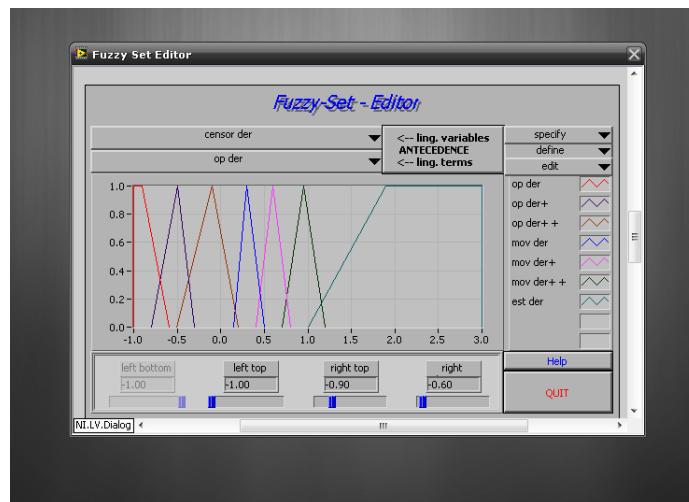


Figura 14. Universo del discurso para señal de entrada “sensor derecho”.

El universo del discurso diseñado para la variable de salida se muestra en la figura 15. Se puede observar que es mucho más simple que las variables de entrada, sin embargo también fue el más difícil de obtener. El actuador utilizado

requiere una potencia mínima de 8W para funcionar sin dificultad, por lo que la salida del control diseñado no puede ofrecer valores menores a 4 volts para evitar que el actuador consuma potencia sin poder desplazar la estructura del panel. Tampoco puede entregar valores mayores a 5 volts para evitar que consuma demasiada potencia y se desplace demasiado rápido. Por tales motivos, la variable de salida está constituida por tres funciones miembro que describen el comportamiento deseado de forma satisfactoria. Las etiquetas de cada función se muestran en la parte derecha, y estas son:

- “-5” (en rojo) con un dominio de -5 a -4. Los valores contenidos dentro de este dominio representan un giro del seguidor solar en dirección del oeste al este.
- “+5” (en verde) con un dominio de 4 a 5. Los valores contenidos dentro de este dominio representan un giro del seguidor solar en dirección del este al oeste.
- “0” (en azul) con un dominio de -0.1 a +0.1. Los valores contenidos dentro de este dominio indicarán al actuador que debe permanecer estático.

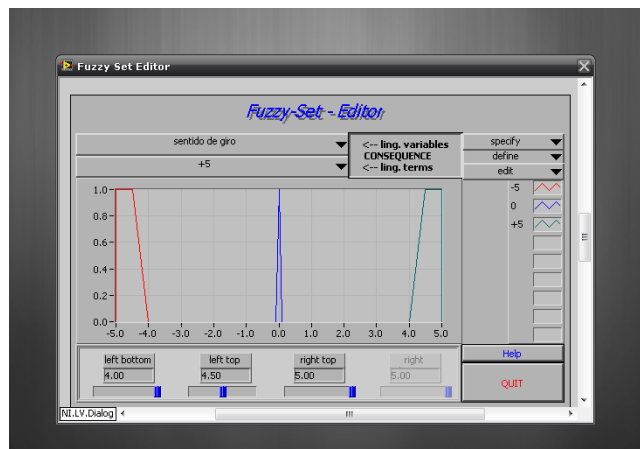


Figura 15. Universo del discurso para variable de salida (sentido de giro del actuador).

C.3.2 Evaluación de reglas

La evaluación de reglas es un procedimiento que consiste en asignar a cada una de las combinaciones difusas de entrada una variable difusa de salida. Dentro de la librería *Fuzzy Logic Controller Design Project Manager* se tiene el editor de reglas, donde se encuentran todas las combinaciones posibles de las entradas difusas y la opción de asignar a cada combinación una posible solución de salida.

En esta parte es importante mencionar que todas las reglas de evaluación fueron realizadas en base a la experiencia acerca del comportamiento del seguidor solar. Estas reglas pueden ser modificadas posteriormente para mejorar el comportamiento del sistema. La figura 16 muestra algunas de las reglas de evaluación que se implementaron para el control del sentido de giro del motor. En la parte superior derecha se tiene un selector, para seleccionar el método de defuzzificación que se quiere emplear.

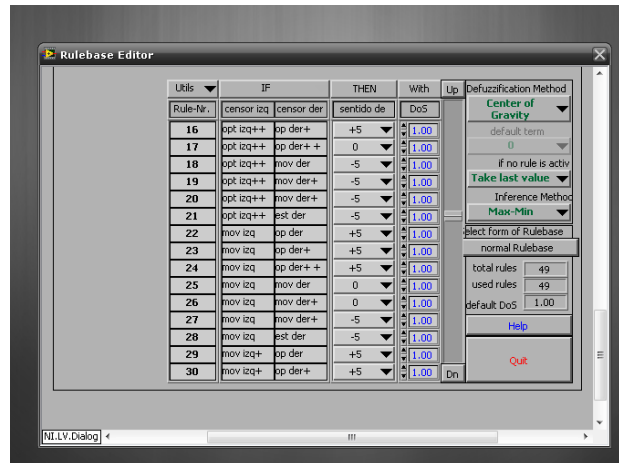


Figura 16 Reglas de evaluación para el control de sentido de rotación del motor

Todas las reglas siguen las mismas condiciones. Se compararán ambas señales de entrada, cuando una de ellas tenga mayor amplitud que la otra, el sentido del giro del motor será en esa dirección, en otro caso, cuando ambas señales mantienen la misma amplitud, el motor se mantendrá en su posición. Por ejemplo, si se observa la regla número 21 mostrada en la Figura 16, cuando el sensor izquierdo tiene como entrada un valor contenido en la etiqueta “optizq” (óptimo izquierda) y el sensor derecho entrega un valor contenido en la etiqueta “est der” (estático derecha).

El último proceso en un control difuso es conocido como defuzzificación, el cual es encargado de proporcionar un valor numérico acorde a las funciones miembro y las reglas de evaluación, este proceso se realiza de forma automática, sólo hay que seleccionar el método de defuzzificación. En este caso se seleccionó el método de Centro de Gravedad, que es el más común.

C.3.3 Diagrama de bloques y panel frontal

En el diagrama de flujo de la figura 17 se muestra un bosquejo de cómo funciona el sistema.

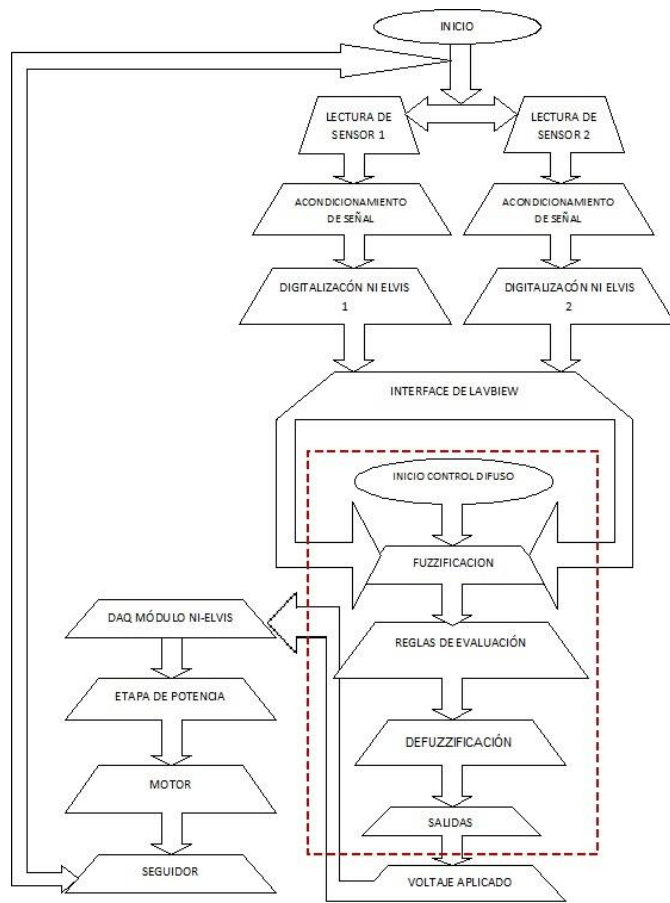


Figura 17. Diagrama de flujo del comportamiento del sistema.

Desde la etapa de digitalización hasta la etapa de voltaje aplicado en la salida del controlador difuso, corresponden a programación interna en LabVIEW. Esta programación se muestra en la figura 18; en cuanto a lo demás es circuitería externa de acondicionamiento y potencia para las señales.

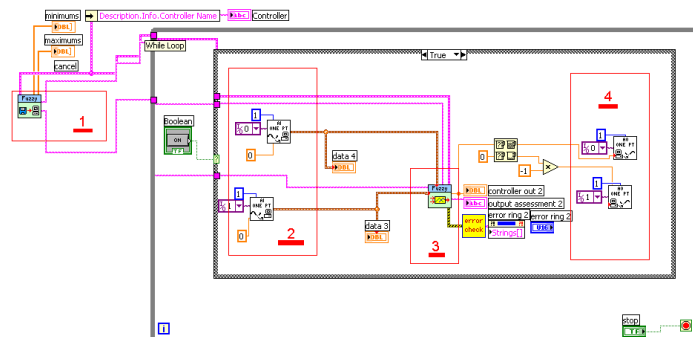


Figura 18. Diagrama de bloques del controlador difuso.

En la Figura 19 Se muestra el panel frontal para el monitoreo del sistema. En él se observan tanto las señales acondicionadas a la entrada, como la señal de respuesta del sistema a la salida. Todos los datos son mostrados en forma numérica.

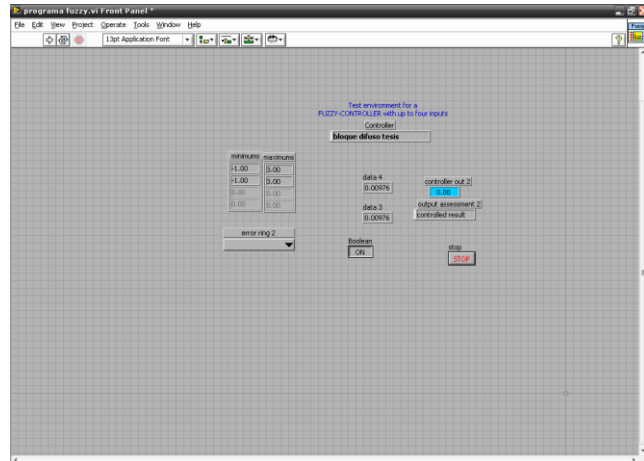


Figura 19. Panel frontal para el monitoreo del sistema.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento del prototipo, se realizó el registro experimental de datos durante varios días alcanzando aproximadamente 600 muestras diarias capturadas a través de dos multímetros con interfaz para computadora personal, cada uno conectado a una computadora como se muestra en la Figura 20, uno capturaba el voltaje y otro la corriente de la carga conectada al panel fotovoltaico cada 60 segundos. Se optó por conectar el panel solar a una carga lineal para facilitar el análisis y las mediciones. La carga consistió en 6 lámparas de 20 Watts, conectadas en tres pares de lámparas en paralelo y cada par en serie, como se observa en la Figura 21. La carga total del arreglo de lámparas es de 120 Watts y la potencia máxima nominal entregada por el panel es aproximadamente 80 watts pero se observó que en las horas de mayor insolación se superaba ampliamente esta potencia generada, alcanzando cerca de 100 watts.



Figura 20. Interfaz de multímetros para el registro de datos de voltaje y corriente.



Figura 21. Carga de lámparas de 120Watts conectadas a los multímetros y al panel solar.

Los datos recopilados fueron procesados para realizar el análisis y comparación de resultados.

Se utilizó la plataforma NI ELVIS (Figura 6), como interfaz entre la computadora y las señales analógicas de entrada obtenidas por los circuitos con LDRs colocados en la estructura del panel. Para conectar el sistema del seguidor con la plataforma NI ELVIS se utilizó cable UTP para transmitir las señales de los circuitos con las LDRs hacia la plataforma NI ELVIS (Figura 22).



Figura 22. Panel solar conectado mediante cable UTP a la consola NI ELVIS.

Se realizaron las lecturas con panel en estado fijo y con panel en movimiento controlado mediante lógica difusa, con el objetivo de comparar la capacidad de generación de energía en ambos sistemas. Mediante el uso de Microsoft Excel se graficó la potencia consumida por la carga respecto al tiempo y se determinó el modelo lineal más adecuado con su correspondiente índice de correlación R^2 para comprobar si las ecuaciones obtenidas representaban correctamente el comportamiento de la curva.

El panel fijo se colocó en una latitud de 80° con respecto al horizonte para captar el sol al medio día con mayor intensidad; se observó que las nubes disminuyen la energía generada por el panel. La Figura 23 muestra un gráfico con los datos de potencia obtenidos durante el primer día de pruebas con panel fijo.

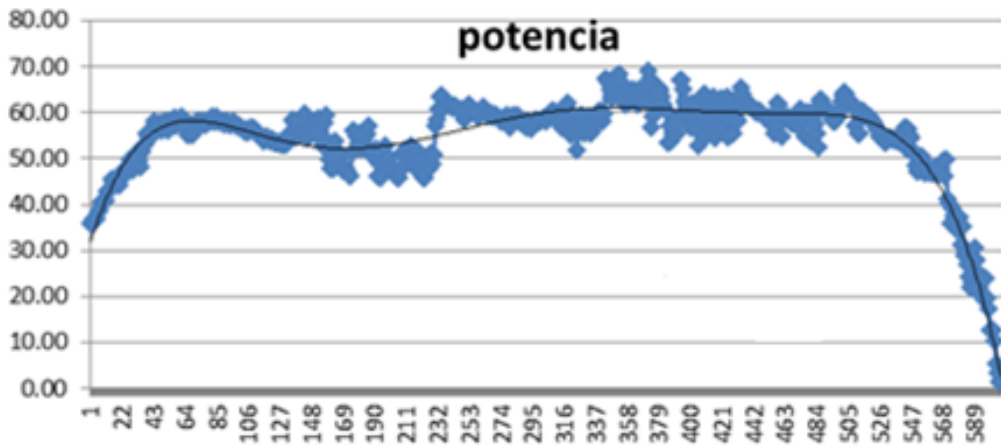


Figura 23. Gráfica de la potencia generada por el panel en estado fijo con respecto al tiempo

En (2) se describe el comportamiento de la gráfica de la Figura 39 con $R^2 = 0.9017$.

$$y = -2(10^{-12})x^6 + 4(10^{-10})x^5 - 3(10^{-7})x^4 + 9(10^{-5})x^3 - 0.0149x^2 + 1.0759x + 30.813 \quad (2)$$

Integrando (2) se obtiene la energía total entregada durante el día: 0.9051 KWH.

En el primer día de pruebas con el seguidor solar en modo automático, el panel solar se orientó al Este desde el primer rayo solar detectado por los sensores. Conforme pasa el día el panel se mueve siguiendo la trayectoria del sol hasta el anochecer. La generación de potencia durante el transcurso del día se muestra en la figura 24.

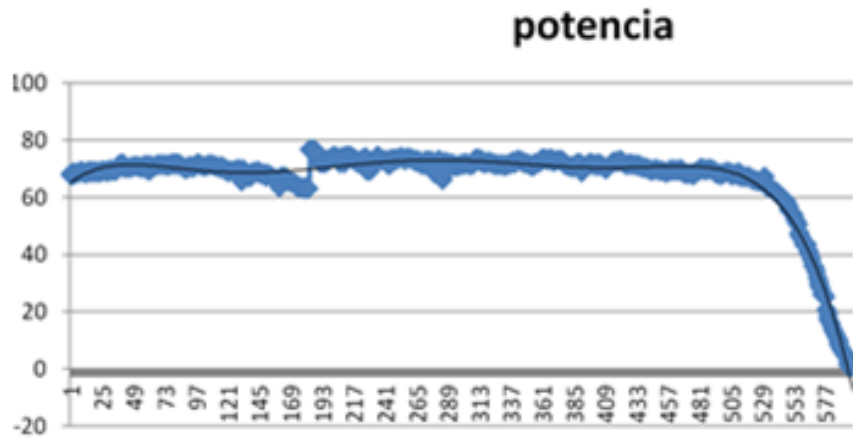


Figura 24. Gráfica de la potencia obtenida por seguidor en modo automático con respecto al tiempo.

En (3) se describe el comportamiento de la energía obtenida durante el primer día de pruebas con $R^2 = 0.9747$.

$$y = -2(10^{-13})x^6 + 3(10^{-10})x^5 - 2(10^{-7})x^4 + 5(10^{-5})x^3 - 0.0064x^2 + 0.3495x + 64.945 \quad (3)$$

Calculando la integral de (3) se obtiene la energía entregada por el panel en movimiento durante el día: 1.112 KWH.

El motor del seguidor demanda 2 A para mover al panel y a la estructura, con un voltaje de 5 V, es decir, consume 10 W durante 2 segundos que es el tiempo de posicionamiento del panel. Se estimó que el motor consume en un día de trabajo 0.061 Watt-hora, aproximadamente.

La comparación de la energía generada por el panel en movimiento respecto a la correspondiente energía generada por panel fijo se muestra en (4):

$$\Delta_n = \frac{\text{Energía con seguidor}}{\text{Energía con posición fija}} * 100 - 100 \quad (4)$$

Se sustituyen los valores y se obtiene:

$$\Delta_n = \frac{1.110KWH}{0.905KWH} * 100 - 100 = 22.65\%$$

Se logró aumentar en 22.65 % la generación de energía eléctrica en el panel usando el seguidor solar, respecto a la energía generada con panel fijo.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de control de lógica difusa a un seguidor solar aumenta en más de 20% la generación de energía eléctrica respecto a un panel solar fijo.

El diseño de la estructura del seguidor solar fue sencillo y apto para la aplicación del sistema de control.

En los puertos de entrada del módulo NI ELVIS las señales de entrada cercanas a cero eran interpretadas como valores negativos es por eso que se optó por ampliar el rango del universo del diseño del control difuso ya que al tener valores negativos como lecturas el sistema no funcionaba adecuadamente.

Al principio se pretendió trabajar con la tarjeta DSP TMS320LF2407A de la Texas Instruments para así poder tener un sistema totalmente aislado de una computadora pero por la falta de compatibilidad de la tarjeta DSP con la plataforma de programación LAB VIEW se optó por utilizar el modulo NI-ELVIS.

También se quería usar inicialmente el programa MATLAB para el diseño del sistema de control ya que cuenta con la posibilidad de manejar múltiples señales de salida, cosa que no es posible con la plataforma de programación LabVIEW, ya que esta sólo trabaja con una señal de salida, pero al final se determinó que no era necesario tener múltiples señales de salida.

V. TRABAJO FUTURO

- Probar el seguidor solar durante periodos prolongados para verificar si varía su desempeño en la generación de energía eléctrica.
- Diseñar un seguidor multipanel.
- Diseñar una etapa de acoplamiento de la tarjeta DSP TMS320LF2407A de la Texas Instrument con la plataforma de programación LAB VIEW ya que las señales con las que trabaja el sistema son ideales para implementar esta tarjeta DSP.

VI. REFERENCIAS

- [1] Página web con información sobre sistemas de control, Fecha de consulta:17/08/2017. Dirección: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>
- [2] E. Figueroa Fernández, “Análisis, diseño y construcción de un seguidor solar para celdas fotovoltaicas”, tesis de Ingeniero en Ejecución Electrónica, presentada en noviembre del 2010, Universidad Mayor, Facultad de Ingeniería, Santiago de Chile.
- [3] J. Beltrán Adán, “Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos”, tesis de Maestría en Ciencias, presentada en noviembre del 2007, CENIDET (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico), Cuernavaca, Morelos, México.
- [4] C. Pintos Lanzuela, “Seguidor solar ligero para cubiertas”, tesis de Ingeniería Industrial, presentada en junio del 2010, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [5] Página web consultada en noviembre de 2017, “Manuales sobre energía renovable Solar fotovoltaica”, FOCER, Primera edición, San José, Costa Rica, 2002. Dirección: <http://www.bun-ca.org/publicaciones/FOTOVOLT.pdf>
- [6] O. Beltrán González, y J. Hernández Aguilar, “Diseño de un sistema de control para seguidor solar implementando lógica difusa en Arduino”, tesis de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, presentada el 29 de enero de 2016, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- [7] Página web con manuales de LabView, consultada en agosto de 2017. Dirección: <http://www.ni.com/manuals/esa/>
- [8] Página web con el manual del módulo ELVIS de Nacional Instruments, consultada en enero de 2017. Dirección: <http://www.ni.com/pdf/product-flyers/ni-elvis.pdf>
- [9] Página web con información del DAQ USB-6008/6009 DE National Instruments, consultada en agosto de 2017. Dirección: https://www.tau.ac.il/~electro/pdf_files/computer/ni_6008_ADC_manual.pdf
- [10] Página web con información sobre fotorresistencias, consultada el 25/11/2017. Dirección: <https://es.slideshare.net/luislm29/fotorresistencias-34542177>

[11] Página web con información del puente H, consultada en agosto de 2017. Dirección:
<http://www.ingmecafenix.com/electronica/puente-h-control-motores/>

VII. BIOGRAFÍA

Rafael Villela Varela, Doctor en Educación y profesor del Cuerpo Académico “Sistemas de Control y Comunicaciones”, perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Claudia Reyes Rivas, Maestra en ingeniería con especialidad en control y profesora del Cuerpo Académico “Sistemas de Control y Comunicaciones”, perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Francisco Eneldo López Monteagudo Graduado de Ingeniero Electricista en 1981, Doctor en Ciencias Técnicas en 1999, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. Profesor titular de la Universidad Central de las Villas Cuba desde 1981 hasta el 2009. Actualmente es profesor-investigador de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. eneldolm@yahoo.com

Alejandro Chacón Ruiz, Maestro en ingeniería con especialidad en comunicaciones y profesor del Cuerpo Académico “Sistemas de Control y Comunicaciones”, perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Aurelio Beltrán Telles, Maestro en ingeniería con especialidad en control y profesor de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.